



Mayo de 2015

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD
TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO
DEL LFH COMO COADYUVANTE
EN EL PROCESO DE SECADO EN
TRANSFORMADORES EN
COLOMBIA**

Gina Marcela Bueno Barreto
UNIVERSIDAD DEL VALLE, INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DEL LFH
COMO COADYUVANTE EN EL PROCESO DE SECADO EN
TRANSFORMADORES EN COLOMBIA**

GINA MARCELA BUENO BARRETO



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

SANTIAGO DE CALI

2015

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DEL LFH
COMO COADYUVANTE EN EL PROCESO DE SECADO EN
TRANSFORMADORES EN COLOMBIA**

Trabajo de grado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniera
Electricista

GINA MARCELA BUENO BARRETO

Director

Profesor, DIEGO FERNANDO GARCÍA GÓMEZ

Ingeniero Electricista, Ph.D

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

SANTIAGO DE CALI

2015

"Aprendí que no se puede dar marcha atrás, que la esencia de la vida es ir hacia adelante. En realidad, la vida es una calle de sentido único."

- Agatha Christie-

AGRADECIMIENTOS

La colaboración que las personas pueden brindarnos nunca está de más, es por esto que quiero agradecer a cada uno de los que de una u otra manera me ofrecieron su ayuda y apoyo a lo largo de esta etapa de mi vida, no solo académica sino personal y profesionalmente.

Agradezco primeramente a mi madre, *Cecilia Barreto*, por su constante amor, apoyo, entrega y comprensión durante, no solo mi carrera, sino a lo largo de toda mi vida.

A mi abuela, *Blanca Torres*, por sus enseñanzas y ejemplo de perseverancia, las cuales día a día me sirvieron para jamás desistir.

A mi hermana, *Vanessa*, por su valioso apoyo.

A mis tíos, *Manuel, Jesús y Miguel*, por enseñarme a no desistir.

A mi mejor amigo, *Junior*, por todos estos años de amistad, donde nunca dejo de creer en mí.

A mis compañeros: *María, Laura, Wilver, Jairo, Alejandro, Andrés, Gustavo, Nathalia, Asly, Sebastián, Álvaro, Oscar, Daniel, Rubén, Yeiner*. Que a lo largo de éste proceso se convirtieron en amigos y que siempre estuvieron conmigo brindándome comprensión y cariño.

Por último, pero no menos importante, a mi Director *Diego Fernando García*, por la confianza que depositó en mí y por el apoyo que me brindó, no sólo en el desarrollo de mi trabajo de grado sino también en momentos en los cuales necesité un consejo y una guía.

Gracias a Dios. Gracias a todos.

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	14
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2.	JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.3.	OBJETIVOS DEL TRABAJO	15
1.4.	ESQUEMA DEL TRABAJO.....	15
2.	LA HUMEDAD Y EL SECADO EN CAMPO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	17
2.1.	COMPOSICIÓN DEL AISLAMIENTO EN EL TRANSFORMADOR	17
2.1.1.	Diagnóstico del papel	19
2.1.1.1	Determinación del grado de polimerización (DP).....	19
2.1.1.2	Análisis de gases disueltos (DGA).....	20
2.1.1.3	Análisis de furanos disueltos en el aceite	21
2.1.1.4	Factor de potencia del aislamiento (FP)	22
2.2.	PROCESOS DE DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN EL TRANSFORMADOR.....	24
2.2.1.	Hidrólisis.....	25
2.2.2.	Oxidación	25
2.2.3.	Pirólisis.....	25
2.2.4.	Influencia del aceite.....	26
2.3.	HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR.....	26

2.4.	PROCESOS DE SECADO EN EL TRANSFORMADOR	28
2.4.1.	Secado por circulación de aceite	30
2.4.2.	Secado por circulación de aire caliente.....	30
2.4.3.	Secado por vacío con aplicación de calor	31
2.4.4.	Secado por vapor de keroseno	32
2.4.5.	Calentamiento de baja frecuencia (LFH) como técnica coadyuvante en el proceso de secado	32
3.	DIMENSIONAMIENTO DE LA FUENTE LFH	33
3.1.	PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA POTENCIA Y LA TENSIÓN DE LA FUENTE LFH	33
3.2.	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LA FUENTE LFH	46
4.	ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL USO DEL LFH EN LOS PROCESOS CONVENCIONALES DE SECADO	47
4.1.	RENDIMIENTO DE LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE SECADO	49
4.2.	RENDIMIENTO CON LA INCLUSIÓN DEL LFH EN LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE SECADO	60
4.3.	ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS PROCESOS DE SECADO EN TRANSFORMADORES.....	69
4.4.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS PROCESOS DE SECADO EN TRANSFORMADORES.....	72
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	79
5.1.	CONCLUSIONES GENERALES.....	79
5.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	79
6.	BIBLIOGRAFÍA	81

Anexo I. Datos de los transformadores empleados para el dimensionamiento del a fuente LFH	84
Anexo II. Resultados para el cálculo de condensadores en conexión Y	86
Anexo III. Resultados para el cálculo de condensadores en conexión delta.....	88
Anexo IV. Resultados para el dimensionamiento de la fuente LFH.....	90

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Composición química de la celulosa.....	17
Figura 2. Tipos de estructura del papel dentro del transformador.....	19
Figura 3. Rata de envejecimiento del papel en función de los procesos de degradación	26
Figura 4. Fuentes de ingreso de agua al transformador.	27
Figura 5. Esquema de la dinámica de humedad en el sistema papel-aceite	28
Figura 6. Criterios de clasificación de los métodos de secado convencionales.....	29
Figura 7. Esquema general del proceso de circulación de aceite.....	30
Figura 8. Esquema general para el método de secado por circulación de aire caliente.....	31
Figura 9. Diagrama esquemático de la conexión	35
Figura 10. Proceso para el cálculo de los valores de la fuente LFH.	38
Figura 11. Característica de potencia para una frecuencia de 0.2 Hz, respecto a su capacidad nominal.	38
Figura 12. Característica de tensión para una frecuencia de 0.2 Hz, respecto a su capacidad nominal.	39
Figura 13. Característica de potencia para una frecuencia de 5 Hz, respecto a su capacidad nominal.	39
Figura 14. Característica de tensión para una frecuencia de 5 Hz, respecto a su capacidad nominal.	40
Figura 15. Comportamiento de potencia para un transformador de 20 MVA.....	41
Figura 16. Comportamiento de potencia para un transformador de 115 MVA.....	41

Figura 17. Comportamiento de tensión para un transformador de 20 MVA.....	42
Figura 18. Comportamiento de tensión para un transformador de 115 MVA.....	42
Figura 19. Conexión del banco de condensadores trifásico calculado.	45
Figura 20. Comportamiento de la potencia aparente con la conexión del banco de condensadores en estrella o delta.	45
Figura 21. Evolución de la concentración de humedad en el papel y en el cartón prensado, espesor de 2 mm.	50
Figura 22. Evolución de la concentración de humedad en el papel y en el cartón prensado, espesor de 3 mm.	51
Figura 23. Caso de perfil de humedad como una función del perfil de temperatura del aceite dentro de un transformador.	52
Figura 24. Condición de equilibrio entre el papel-aceite.	55
Figura 25. Evolución del contenido de humedad para un papel de 0.5 mm.	56
Figura 26. Evolución del contenido de humedad para un papel de 1 mm.	56
Figura 27. Evolución del contenido de humedad para un papel de 3 mm.	57
Figura 28. Evolución del proceso de secado durante 4 semanas a diferentes temperaturas.....	58
Figura 29. Spray de aceite caliente vs Aceite caliente a 40 °C.....	59
Figura 30. Spray de aceite caliente vs Aceite caliente a 80 °C.....	59
Figura 31. Transformadores de potencia secados en campo con la tecnología LFH.	61
Figura 32. Proceso de secado de aerosol de aceite caliente con LFH.	61
Figura 33. Velocidad de secado para diferentes métodos, desde un 3% de humedad hasta un 1.5%.	63
Figura 34. Tiempo de secado a un transformador de 400 MVA con diferentes métodos, desde con un 3% de humedad hasta un 1.5%.	64

Figura 35. Esquema de la configuración utilizada por ABB en el uso de LFH.	65
Figura 36. Simulación de comparación entre el OH y OH con LFH.	67
Figura 37. Comparación entre HO y HO+LFH a muestras de 5 mm de espesor...	68
Figura 38. Comparación entre HO y HO+LFH a muestras de 3 mm de espesor...	69
Figura 39. Comparación de diferentes métodos de secado en términos de tiempo de proceso, inversión, costes de mantenimiento y energía necesaria. .	75
Figura 40. Requisitos de energía térmica y eléctrica en los procesos de secado..	76

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Valores de referencia para determinar la condición del papel de acuerdo al DP	20
Tabla 2. Gases que encuentran típicamente en líquido aislante del transformador bajo condiciones de falla	21
Tabla 3. Características recomendadas de diagnóstico en el papel.	23
Tabla 4. Límites sugeridos para uso prolongado de aceite aislante.	24
Tabla 5. Valores típicos de transformadores	34
Tabla 6. Guía de porcentajes para la interpretación del porcentaje de saturación de agua en el aceite.....	48
Tabla 7. Guía para la interpretación del porcentaje de humedad para el papel seco en peso.	48
Tabla 8. Correlación de datos de ensayos de secado convencionales.....	70
Tabla 9. Correlación de datos comparativos entre diferentes métodos de secado, incluyendo LFH.	71
Tabla 10. Duraciones de funcionamiento continuo para diferentes valores de pérdida de vida.	74

RESUMEN

Conociendo que el transformador es un elemento fundamental en el proceso de transmisión y distribución de energía eléctrica dentro de un sistema de potencia, se hace de vital importancia mantener en un estado óptimo el aislamiento tanto sólido (aislamiento a base de celulosa) cómo líquido (aceites minerales, ésteres, etc.), ya que la vida útil del transformador depende directamente de la calidad de estos. Precisamente la calidad de los aislamientos puede verse afectada por diversos procesos que contribuyen a su envejecimiento. El aislamiento líquido es fácilmente regenerable o reemplazable mientras que el aislamiento sólido no. La humedad es uno de los agentes que influye directamente en el envejecimiento de los aislamientos celulósicos del transformador de potencia.

En este trabajo se realiza un análisis del efecto que tiene la humedad en los transformadores y los mecanismos que existen para eliminarla o disminuirla a valores seguros, lo cual se logra a través de los procesos de secado. En busca de la mejora de éstos, se incursiona con el calentamiento a baja frecuencia o LFH, la cual mejora los procesos de secado reduciendo costos, tiempo, la cantidad de energía requerida para el proceso, al igual que la cantidad de recursos requeridos. Lo mencionado anteriormente conlleva a realizar un análisis técnico y económico de la posibilidad que tiene el país para incursionar con el método del LFH como proceso de mejora durante los secados en transformadores de potencia.

Palabras clave: Análisis económico, Análisis técnico, Humedad, LFH, Secado, Transformador.

ABSTRACT

Power transformer is an essential element in the transmission and distribution process of electrical energy. Therefore is vital to maintain an optimal state of its liquid insulation (oils minerals, esters, etc.) and solid insulation (insulation based on cellulose). The transformer life expectance depends directly on the aging of its insulations. Precisely the quality of the insulation can be affected by various processes that contribute to aging. The liquid insulation is easily replaceable or regenerable whereas the solid insulation is not. Moisture is one of the agents that affects directly the aging of cellulose insulation in power transformers.

This undergraduate work presents an analysis of the effect of moisture in transformers and the drying used to eliminate or reduce this to safe values. Low frequency heating or LFH is a technique which improves drying processes reducing costs, time, energy and resources required for the process. The above mentioned behavior was analyzed from the technical and economic point of view for to evaluate the possibility to use LFH method for improvement the dry out process in power transformers.

Keywords: *Economic analysis, technical analysis, Moisture, LFH, Drying, Transformer.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La vida del aislamiento y por lo tanto la vida útil de los transformadores se puede ver afectada por varios procesos de degradación como la hidrólisis, la oxidación y pirolisis. Sin embargo, la humedad o el acceso de agua al transformador deteriora de forma rápida la calidad de los aislamientos del mismo, reduciendo el margen dieléctrico, el voltaje de inicio de las descargas parciales, aumentando la probabilidad de formación de burbujas en su interior y la tasa de envejecimiento de los materiales aislantes a base de celulosa, lo que conlleva a una alta probabilidad de fallas inesperadas. El ingreso de agua al transformador se origina de varias maneras, considerando como principal fuente la humedad proveniente desde la atmósfera, por la exposición directa con el flujo de aire húmedo cuando el transformador pierde estanqueidad o como parte del proceso de compensación del volumen del aceite, en aquellos transformadores con sistema de respiración libre.

En cualquier caso, el mantener la humedad al interior del transformador en niveles bajos, es requisito indispensable para preservar la vida útil del transformador de potencia y por ello durante su etapa de operación, es necesario realizar procesos de secado para extraer la humedad alojada en los aislamientos. Debido a los costes del secado, especialmente al coste por la indisponibilidad del equipo del sistema de transmisión, se requiere que los procesos de secado sean rápidos y altamente eficientes, es decir, que sean capaces de extraer la mayor cantidad posible de agua del transformador, en el menor tiempo posible sin perjuicio adicional para la máquina.

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la importancia que tiene el control de humedad en los transformadores, sobre todo en los de potencia, se hace importante realizar procesos de secado, con la finalidad de extraer la mayor cantidad de agua posible y disminuir los riesgos ya conocidos. Dentro de los métodos convencionales de secado en transformadores se encuentran: secado por circulación de aceite, secado por circulación de aire caliente, secado por vacío con aplicación de calor y secado por vapor de keroseno. Sin embargo, la utilización de cualquiera de estos métodos demanda una gran cantidad de tiempo y por lo tanto esto implica un coste alto, ya que la mayoría de estos procesos, deben realizarse con el transformador off-line o fuera de red.

Por ello, se hace fundamental para las empresas de energía, optimizar los tiempos de duración de secado de los transformadores y al mismo tiempo reducir los costos de la implementación de los diferentes métodos. Debido a esto aparece la técnica LFH, *Low Frequency Heating*, que es un método coadyuvante en el proceso de secado del transformador, el cual consiste en introducir una corriente controlada de baja frecuencia, inferior a 2 Hz, con bajos niveles de tensión, por medio de convertidores o arrancadores de motores en el devanado de alta tensión, manteniendo los de baja tensión cortocircuitados.

Éste método de ayuda conserva la calidad del aislamiento, debido a que el calor es generado directamente en los devanados del transformador, el lugar indicado para extraer la humedad del aislamiento, teniendo en cuenta que la temperatura en ellos se puede controlar con precisión.

1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo general de este trabajo de grado fue analizar la viabilidad técnica y económica del uso del LFH como coadyuvante en el proceso de secado en transformadores en Colombia.

Los objetivos específicos planteados fueron:

- Realizar un análisis bibliográfico.
- Realizar un estudio a las diferentes empresas de energía en Colombia para conocer las características básicas de sus transformadores de potencia, requeridas para el dimensionamiento del sistema LFH.
- Realizar una comparación técnica del proceso de secado en transformadores cuando es utilizado como coadyuvante el método del LFH y cuando se realiza el proceso convencional.
- Realizar una comparación económica del proceso de secado en transformadores cuando es utilizado como coadyuvante el método del LFH y cuando se realiza el proceso convencional.

1.4. ESQUEMA DEL TRABAJO

Este trabajo está distribuido en 5 capítulos los cuales se abordan de la siguiente manera.

En el Capítulo 1 se realiza una descripción general del trabajo de grado, presentando el planteamiento del problema que se pretende abordar, la justificación del mismo y los objetivos planteados.

En el Capítulo 2 se aborda la humedad y el secado en campo de transformadores de potencia, detallando la composición del aislamiento con los diferentes procesos que contribuyen a la degradación de estos y explicando como la humedad es el principal factor de envejecimiento del papel y del transformador. Finalmente se plantean los procesos convencionales de secado.

En el tercer capítulo se establece el dimensionamiento de una fuente LFH teniendo en cuenta los datos suministrados de potencia nominal, tensión nominal, impedancia de cortocircuito, pérdidas con carga y la corriente nominal de algunos transformadores de la región.

En el cuarto capítulo se realiza el análisis técnico y económico del uso del LFH en los procesos convencionales de secado, teniendo en cuenta toda la literatura estudiada y los diferentes ensayos realizados por varios investigadores.

Por último en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo y se proponen trabajos futuros que pueden desarrollarse, de acuerdo a los resultados y a las limitaciones encontradas a lo largo del mismo.

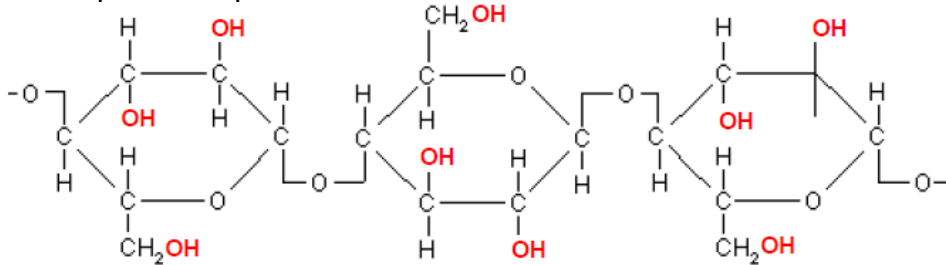
2. LA HUMEDAD Y EL SECADO EN CAMPO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

2.1. COMPOSICIÓN DEL AISLAMIENTO EN EL TRANSFORMADOR

La función principal que tiene el aislamiento en un transformador de potencia es aislar eléctricamente los puntos que tienen diferente potencial. El aislamiento está formado por dos partes, el aislamiento líquido (aceite) y el aislamiento sólido a base de celulosa (denominado genéricamente como papel). El primero además de ser el aislamiento líquido del transformador, actúa como agente refrigerante conduciendo el calor de la parte activa hacia el exterior. Los líquidos dieléctricos más empleados son los aceites minerales, aunque actualmente se ha incrementado el uso de los ésteres sintéticos y de origen vegetal así como otros tipos de líquidos aislantes como siliconas (García, 2012).

El material utilizado como aislamiento sólido es el papel y los cartones prensados, (*pressboard* en inglés), los cuales se obtienen principalmente de la celulosa con una tasa alrededor del 85%, hemicelulosas (aproximadamente 15%) y lignina (aproximadamente 6%). Además de encontrar la celulosa en el algodón, se utilizan las maderas blandas y/o duras para la extracción de la misma, con el fin de fabricar el papel para los sistemas de aislamiento no solo de un transformador sino de cualquier máquina eléctrica. En la Figura 1 se puede ver la composición química de la celulosa, la cual hace que los materiales empleados para los aislamientos sólidos sean altamente hidrófilos, debido a la alta cantidad de grupos OH en la molécula (Flores Castro, 2011).

Figura 1. Composición química de la celulosa



Tomado de (Cigré Brochure 349, 2008)

El proceso de la fabricación del papel es largo y complejo, pasando por varias etapas hasta su tratado final. En transformadores, el método utilizado es el proceso Kraft, en el cual la madera se trata con una mezcla de hidróxido de sodio y sulfato de sodio. Los efectos del envejecimiento térmico del papel pueden reducirse, por

medio de procesos como la neutralización parcial de los agentes formadores de agua, por ejemplo melanina, o mediante la limitación de la formación de agua a través del uso de sustancias estabilizantes. Cuando se realiza este incremento térmico se considera que el papel ha sido “térmicamente mejorado”, optimizando la resistencia mecánica durante el funcionamiento del equipo y permitiendo elevaciones en la temperatura de operación, la cual es de aproximadamente 65 °C por encima de temperatura ambiente en condiciones de carga plena (Flores Castro, 2011).

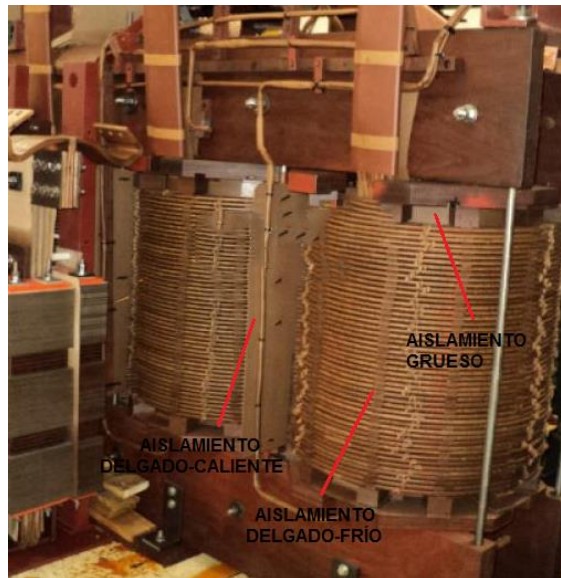
Un transformador de potencia estándar puede contener entre 10 y 12 toneladas de papel, de entre 30 a 120 micrómetros de grosor y 45 toneladas de aceite, con cantidad de humedad, anterior al proceso de secado en fábrica, entre 4% y 5% respecto del peso del papel seco. Después del secado en fábrica, la cantidad de agua en su interior puede disminuir hasta un valor de 0.5%. Adicional a lo que ya se conoce, es decir, que el ingreso de agua al transformador degrada el aislamiento celulósico, también se debe resaltar que el propio proceso de envejecimiento del papel genera formación de ciertas sustancias al interior del transformador como agua, ácidos, CO, CO₂ y varios subproductos de la celulosa, principalmente furanos como el 2-Furaldehído (2-FAL) que afectan de la misma manera la calidad del aislamiento y por lo tanto aumenta la posibilidad de fallas del transformador, por ello se hace importante el diagnóstico de la calidad en el papel (Flores Castro, 2011).

Es importante resaltar que la estructura del aislamiento sólido se puede dividir de acuerdo a su configuración y operación en:

- Delgado caliente: este tipo de aislamiento tiene una baja densidad, se encuentra en contacto con los conductores del transformador y el 5% de ellos se encuentra a la temperatura del punto caliente. En este tipo de aislamiento se encuentra el papel Kraft.
- Delgado frío: este tipo de aislamiento se caracteriza por poseer una densidad media, no se encuentra en contacto con los conductores del transformador y se halla a la temperatura del aceite. En este tipo de aislamiento se incluyen los cartones prensados.
- Grueso: estos tipos de aislamiento se caracterizan por tener una alta sujeción mecánica, alta densidad y poseer la menor temperatura de operación.

En la Figura 2 se ilustran los diferentes tipos de estructura que tiene el papel en el transformador.

Figura 2. Tipos de estructura del papel dentro del transformador.



Tomado de <http://dinamicaelectrica.com.mx/images/transformadores.jpg>, Consultada 1 Octubre 2014.

2.1.1. Diagnóstico del papel

Para el respectivo análisis de la calidad del papel en un transformador se emplean varias técnicas, las cuales se explican brevemente a continuación.

2.1.1.1 Determinación del grado de polimerización (DP)

Las moléculas de celulosa con las que se conforma el papel (ver Figura 1), son polímeros formados por monómeros encadenados. El grado de polimerización es una medida de la longitud promedio de esa cadena, la cual se rompe a medida que el papel se degrada. El valor del DP se relaciona con el estado de la rigidez mecánica del papel, o sea la confiabilidad de éste en la operación segura del transformador.

La medida del DP es una técnica directa para la evaluación de la condición del papel, la aplicación de ésta se realiza siguiendo la norma IEC 60450 o la ASTM D4243. El valor inicial del DP en un transformador está alrededor de 1000, reduciéndose a 950 después del secado en fábrica y a su vez, va disminuyendo con el envejecimiento que obtiene durante su operación (Flores Castro, 2011).

Es difícil establecer un valor exacto de DP para determinar que el aislamiento, y por ende el transformador se encuentra en un estado óptimo. Sin embargo, muchos

investigadores (IEEE C57.91, 2011) en sus estudios han definido valores entre 100 y 250 para considerar al papel es un estado no dañino, evitando así posibles fallas.

A pesar de lo anterior, el CIGRÉ (Nejedly & Newesely, 2004) ha realizado un estimativo que se puede tomar como referencia para valorar la calidad del papel de acuerdo al valor de DP, estos valores se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de referencia para determinar la condición del papel de acuerdo al DP

DP	Condición del Papel
≥ 1000	Sin envejecer
999-601	Ligeramente envejecido
600-401	Medianamente envejecido
400-251	Fuertemente envejecido
250-151	Muy fuertemente envejecido
≤ 150	Extremadamente envejecido

Información tomada de (Nejedly & Newesely, 2004)

2.1.1.2 Análisis de gases disueltos (DGA)

En los transformadores, durante su operación y en especial en condiciones anormales se generan distintos tipos de gases que se disuelven en el aceite. Determinando el tipo y la cantidad de gases disueltos es posible inferir las condiciones que los originaron, las cuales pueden ser anomalías dieléctricas, a un sobrecalentamiento o ambas (Flores Castro, 2011).

La descomposición térmica del aislamiento de la celulosa impregnada de aceite produce diferentes tipos de gases internos en el transformador como óxidos de carbono, metano e hidrógeno. La manera en que los gases mencionados son producidos depende exponencialmente de la temperatura y directamente del volumen del material involucrado en la falla a la temperatura dicha.

Las técnicas utilizadas para interpretar los resultados de DGA son: la relación de gases, representaciones gráficas, método de gases clave; mientras que las utilizadas para monitorear el estado del transformador a partir de los resultados obtenidos por el DGA son: Técnica de relación de gases (método IEC), Representaciones gráficas (método de Duval), Método de los gases clave (Flores Castro, 2011).

En (Martínez & Bermúdez Flores, 2005) se establece que el método más práctico para determinar gases en el aceite es la cromatografía de gases, ya que por medio de esta se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo. De acuerdo a esto, la presencia de hidrógeno, por ser el gas que más fácil se libera ante una falla como un arco eléctrico, es fundamental en dicho estudio. En la Tabla 2 se puede ver un resumen de los gases generados al interior del transformador con su contenido admisible y la falla que los genera.

Tabla 2. Gases que encuentran típicamente en líquido aislante del transformador bajo condiciones de falla

Gas	Chemical formula	Predominant source
Nitrogen	N ₂	Inert gas blanket, atmosphere
Oxygen	O ₂	Atmosphere
Hydrogen ^a	H ₂	PD, overheated oil adjacent to hot metal (core or windings)
Carbon dioxide	CO ₂	Overheated cellulose, air pollution Natural degradation product of cellulose aging which may be accelerated by heat
Carbon monoxide ^a	CO	Overheated cellulose, air pollution Natural degradation product of cellulose aging which may be accelerated by heat
Methane ^a	CH ₄	Overheated oil adjacent to hot metal, or PD
Ethane ^a	C ₂ H ₆	Overheated oil adjacent to hot metal
Ethylene ^a	C ₂ H ₄	Overheated oil adjacent to hot metal
Acetylene ^a	C ₂ H ₂	Arcing in oil
^a Denotes combustible gas. Overheating can be caused both by high temperatures and by unusual or abnormal electrical stress.		

Tomado de (IEEE Std C57.140, 2006)

Adicionalmente en (Margalló Gasco, n.d.) se establece que la norma IEC 60599 sugiere relaciones entre el CO₂ y el CO por encima de un valor de 3 para un envejecimiento normal del aislamiento, de forma que para valores anormales de esta relación pueden detectarse fallos que provoquen una degradación excesiva del papel.

2.1.1.3 Análisis de furanos disueltos en el aceite

Las técnicas de diagnóstico de transformadores deben ser técnicas no invasivas, ya que sería muy costoso y agresivo tener que desencubar un transformador para

realizar un diagnóstico del mismo. Por esta razón, el análisis de compuestos furánicos se realiza determinando los compuestos furánicos disueltos en el aceite, en lugar de analizar los compuestos furánicos presentes en el papel (Margalló Gasco, n.d.).

El análisis de furanos es una técnica que se utiliza para determinar el estado del papel ya que el deterioro del papel aislante origina ciertos gases y moléculas de furanos, en especial de 2-furaldehído (2-FAL), 2-furil-alcohol, 2-cetil-furano, 5-metil-2-furaldehído y 5-hidroximetil-2-furaldehído. Determinando la cantidad de estos compuestos disueltos en el aceite es posible estimar el grado de deterioro en el papel, aunque la correlación entre grado de deterioro del papel y cantidad de furanos es aún tema de investigación. El método normalizado para la medición de furanos se encuentra en la norma IEC 616198 (Flores Castro, 2011).

Estudios experimentales (Höhlein & Kachler, 2005) muestra que el desarrollo de furanos y la degradación del aislamiento sólido es influenciado mayormente por la humedad que por la temperatura, en condiciones de servicio normales para el transformador, es decir a temperaturas entre 75 °C y 95 °C. Además los valores obtenidos difieren entre el tipo de compuesto furánico y el tipo de papel analizado.

Cabe resaltar que la regeneración del aceite disminuye el contenido de componentes furánicos, sin embargo, este procedimiento no los elimina por completo del transformador debido a que el mayor contenido de furanos se encuentra en el papel (Margalló Gasco, n.d.).

Aunque el análisis de furanos y el DGA son estudios que ayudan a determinar la condición del papel, todavía es incierto utilizar valores de diagnóstico, debido a la falta de conocimiento de cómo se forman y evolucionan estos compuestos con el tiempo (Cigré Brochure 323, 2007).

2.1.1.4 Factor de potencia del aislamiento (FP)

Todo aislamiento eléctrico tiene una cantidad medible de pérdida dieléctrica, independiente de la condición que lo cause. Un aislamiento en condiciones óptimas, por lo general, tiene una pérdida muy baja. Las pruebas de FP consisten en la aplicación de una tensión de corriente alterna, no mayor a la nominal. Se mide la corriente de fuga. El FP del aislamiento es la relación entre dicha corriente medida y la corriente total. La corriente de fuga, y por ende el factor de potencia, aumentará a medida que el deterioro en el aislamiento sea mayor (IEEE Std C57.140, 2006).

De acuerdo a (Cigré Brochure 323, 2007) las mediciones dieléctricas son métodos empleados para evaluar el estado del aceite y por tanto del transformador. El factor de potencia en el aislamiento (o su medida equivalente $\tan \delta$), se realiza a la frecuencia nominal de operación. Si los resultados a estos ensayos son demasiados altos, indicará que el aislamiento está contaminado.

El aumento del factor de potencia puede ser causado por la humedad o compuestos polares e iónicos en el aceite. Dicha contaminación reduce la rigidez dieléctrica del aislamiento (IEEE Std C57.140, 2006).

En (Flores Castro, 2011) se establece que en un transformador nuevo el valor del FP debe ser igual o inferior al 0.5%, y en transformadores en operación debe ser inferior al 1%.

Contextualizando las definiciones de los ensayos realizados al aislamiento para determinar su condición, en la Tabla 3 y en la Tabla 4 se pueden observar algunos valores guía, para los cuales se puede decir que el aislamiento y por ende el transformador se encuentra en un estado óptimo de funcionamiento.

Tabla 3. Características recomendadas de diagnóstico en el papel.

Procedure	New transformer	Service-aged transformer
Power factor(< 230 kV)	< 0.5%	< 1.0%
Power factor (>230 kV)	< 0.4%	< 1.0%
Total dissolved gas ^a	< 0.5%	< 0.8%
Moisture content	< 10 (ppm)	< 15 (ppm)
Turns ratio	Within 0.5% of nameplate	Within 0.5% of nameplate

^a For units equipped with nitrogen blankets, total dissolved gas should not exceed 2.0%. Values for natural ester transformers may vary and are not available at this time.

Tomado de (IEEE C57.152, 2013)

Tabla 4. Límites sugeridos para uso prolongado de aceite aislante.

Test and method	Value for voltage class		
	≤69 kV	>69 – <230 kV	230 kV and above
Dielectric strength ASTM D1816 kV minimum 1 mm gap ^{a, c} 2 mm gap ^{a, c}	23 40	28 47	30 50
Dissipation factor (power factor) ASTM D924 25 °C, % maximum ^c 100 °C, % maximum ^c	0.5 5.0	0.5 5.0	0.5 5.0
Interfacial tension ASTM D971 mN/m minimum ^c	25	30	32
Neutralization number (acidity) ASTM D974 mg KOH/g maximum ^c	0.20	0.15	0.10
Water content ASTM D1533 mg/kg maximum (ppm) ^{b, c}	35	25	20
Oxidation inhibitor content ASTM D2668 Type II oil ^c	0.09% minimum, if in original oil.		

^aAlternative measurements of 1.0 mm (0.04 in) and 2.0 mm (0.08 in), respectively, for gaps.

^bThe ppm moisture values shown are based on consensus, which are also given in IEEE Std 637. These values should not be used to infer solid insulation dryness or dielectric integrity. The moisture in oil at a given time cannot be related to insulation moisture caused by nonequilibrium conditions. From a dielectric strength point of view, the moisture in oil limits given could be excessive at low temperatures because of high moisture in oil percent saturation levels. See 4.5. However, in operating units, the same moisture in oil levels might represent low moisture in oil percent saturation levels caused by increased oil temperatures.

^cAny significant changes from previous test data should be investigated.

Tomada de (IEEE Std C57.106, 2006)

2.2. PROCESOS DE DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN EL TRANSFORMADOR

La pérdida de la resistencia mecánica que disminuye la capacidad para soportar cortocircuitos y el envejecimiento del aislamiento celulósico impregnado de aceite es uno de los factores fundamentales que limitan la vida útil del transformador. Sin embargo, algunas investigaciones de los últimos años confirman que el agua y el oxígeno influyen directamente en el envejecimiento del aislamiento sólido y líquido significativamente (Cigré Brochure 323, 2007).

Existen ciertos procesos que contribuyen a la degradación de la celulosa como la hidrólisis, oxidación, la pirólisis y la influencia propia del aceite. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los procesos (Flores Castro, 2011).

2.2.1. Hidrólisis

La presencia de agua en el transformador incrementa la velocidad de degradación del papel aislante. Al inicio de su ciclo de vida contiene menos del 0.5% de agua y puede llegar a contener hasta un 5% de agua al final de su vida útil. Éste es el proceso de degradación más dañino en el envejecimiento del papel.

Hacia el año 1970 Fallou (Cigré Brochure 323, 2007) reveló que la tasa de degradación del aislamiento es 20 veces mayor con un porcentaje entre el 4 y 5% de agua, en comparación con su valor inicial (0.5%). Tiempo después Lundgaard (Cigré Brochure 323, 2007) y otros investigadores explicaron que la hidrólisis de la celulosa es un proceso catalítico y que la velocidad de los ácidos asociados y los iones positivos de hidrogeno pueden entrar en zonas imperfectas de la celulosa. Este hecho hace que el proceso sea autoacelerado. La hidrolisis además de producir agua, produce CO, CO₂, ácidos y compuestos furánicos, todos subproductos del envejecimiento del papel (y no del aceite) (Margalló Gasco, n.d.).

2.2.2. Oxidación

La segunda causa de envejecimiento en el papel es el oxígeno (Margalló Gasco, n.d.). La oxidación origina la acumulación de los aceleradores de envejecimiento adicionales en el transformador, los ácidos. Cuando el nivel de oxígeno del aceite en un transformador se encuentra por debajo de las 2000 ppm la velocidad de degradación del material aislante sólido es cinco veces menor que en un transformador tipo seco (Cigré Brochure 323, 2007).

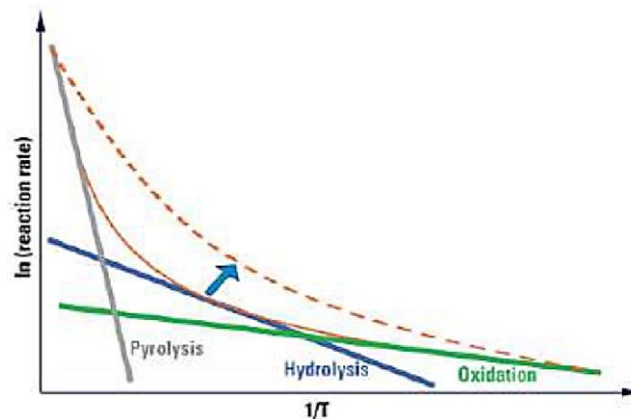
2.2.3. Pirólisis

La pirólisis es la descomposición química de sustancias por medio del calor. Este proceso puede darse sin la presencia de agua y/o oxígeno, o cualquier otro componente que incentive la descomposición. Cuando se habla de la pirólisis en la glucosa, la reacción se da a través de un compuesto deshidratado, en el cual hay pérdidas de agua y formaldehídos, además de un reacomodo de enlaces químicos internos, produciendo furanos y otros productos de degradación. Los principales materiales ocasionados por el deterioro de la celulosa son el agua y el dióxido de carbono, siguiéndoles en orden de importancia los furanos y ciertos compuestos derivados del carbonilo (Cigré Brochure 323, 2007).

2.2.4. Influencia del aceite

El aceite se envejece debido a la oxidación de las moléculas del mismo, debido a la presencia de oxígeno disuelto. En general el aceite tiene niveles de oxígeno y humedad bastante bajos, por lo que logra ser un excelente protector del papel frente a estos y el calentamiento. La reacción con el oxígeno crea sustancias químicas como alcoholes, acetonas, ácidos, entre otros, las cuales son agresivas con el papel desgarrándolo molécula a molécula y disminuyendo su rigidez mecánica. En la Figura 3 se puede observar la rata de envejecimiento de los aislamientos celulósicos en función de los diferentes procesos mencionados anteriormente (Cigré Brochure 323, 2007).

Figura 3. Rata de envejecimiento del papel en función de los procesos de degradación



Tomado de (Cigré Brochure 323, 2007)

En la figura anterior, se puede observar que a pesar de que existen tres factores que alteran el estado del aislamiento sólido, es la humedad la que influye directamente en temperaturas propias de operación del transformador.

2.3. HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR

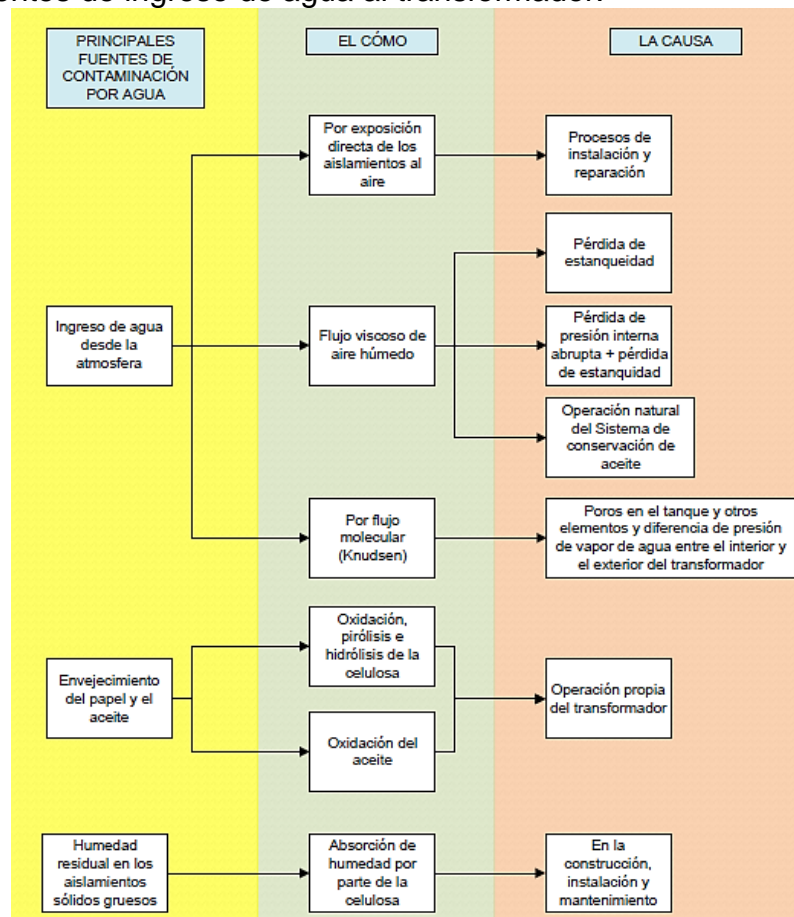
Debido a la naturaleza hidrófoba del aceite y al comportamiento hidrófilo del papel, ante la presencia de agua en el transformador, esta se alojará mayoritariamente en el aislamiento celulósico; por ejemplo, en un transformador de 300 MVA hay presente 10000 kg de papel y 60000 kg de aceite, en ciertas condiciones el contenido de humedad en el papel puede llegar al 3% de su peso, es decir 300 litros de agua; mientras que la concentración de humedad en el aceite es de solo 10 ppm que equivalen a 0.6 litros de agua. Durante la operación del transformador, los contenidos de humedad aumentarán continuamente. Se distinguen hasta el

momento tres fuentes de ingreso de agua al transformador (Cigré Brochure 349, 2008).

- La humedad residual en los "componentes estructurales gruesos" que no se retiran durante el proceso de secado de fábrica o humectación de la superficie de aislamiento durante el montaje, generalmente reducida por evacuación del tanque.
- La entrada de humedad desde la atmósfera
- Humedad como subproducto del envejecimiento o descomposición de la celulosa y el aceite.

El principal mecanismo de ingreso de agua en los transformadores se da a través de los sellos del mismo, por el flujo viscoso de aire húmedo creado por un gradiente de presión total, cuando la presión de la atmósfera es mayor a la presión interna en la cuba del transformador. En la Figura 4 se pueden detallar las diferentes fuentes y mecanismos de ingreso de agua al transformador con sus diferentes causas.

Figura 4. Fuentes de ingreso de agua al transformador.



Tomado de (Garcia, 2013)

Por otro lado, en el transformador existe un notable desequilibrio termodinámico debido a las constantes diferencias de temperatura presentadas entre los dos tipos de aislamiento. Igualmente, la temperatura propia de cada uno se modifica constantemente con la variación de la carga y la temperatura del ambiente. En el aceite el límite de saturación es incrementado con la elevación de temperatura, caso contrario del aislamiento sólido, ya que con la elevación de la misma, la adsorción de agua es reducida considerablemente. Con variaciones de temperatura habrá un flujo continuo de humedad entre el sistema papel-aceite, es decir, se buscará un equilibrio entre ambos. En la Figura 5 se puede observar que al aumentar la temperatura del papel, habrá un flujo de humedad desde los aislamientos sólidos hacia el aceite y al disminuir la temperatura, el flujo de humedad seguirá la dirección opuesta (Garcia, 2012).

Figura 5. Esquema de la dinámica de humedad en el sistema papel-aceite



Tomado de (Garcia, 2012)

2.4. PROCESOS DE SECADO EN EL TRANSFORMADOR

Para mantener por un periodo de tiempo adecuado en operación los transformadores, el contenido de humedad en los aislamientos debe mantenerse en niveles bajos, es por ello que durante el proceso de fabricación y durante la operación del transformador se realizan diferentes procesos de secado que buscan mantener la humedad de la celulosa entre 0.5% y valores inferiores al 1.0%.

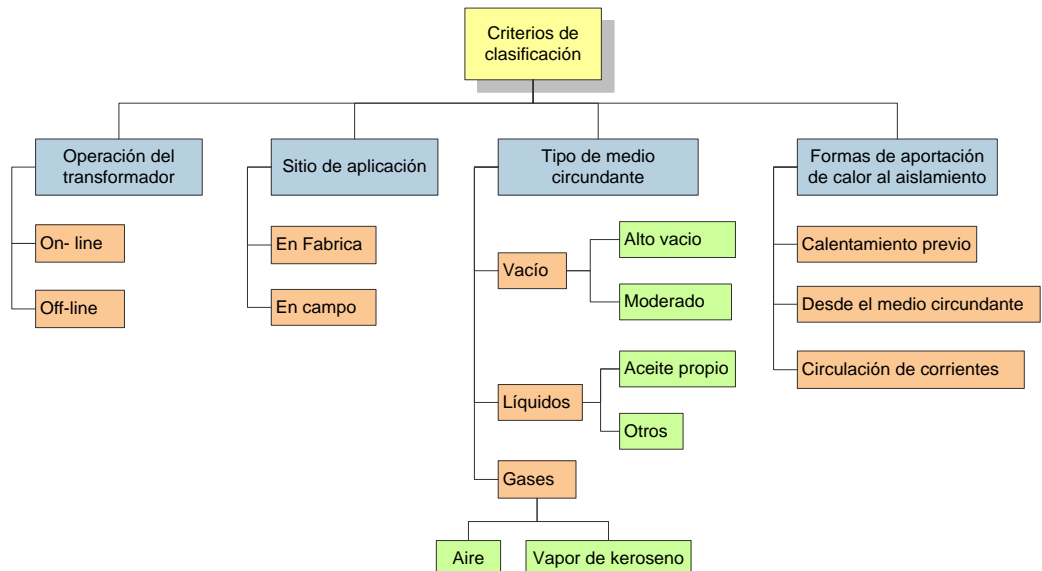
Debido a que es importante reducir al máximo la cantidad de agua presente en los transformadores, se han desarrollado varios métodos para reducir o eliminar las cantidades de agua tanto de la celulosa, que tiene carácter hidrófilo, como del

aceite, cuyo comportamiento es de carácter hidrófobo, teniendo en cuenta que en este último es más sencillo el proceso. Por lo tanto es de vital importancia tener un adecuado método de secado desde la fabricación hasta los respectivos mantenimientos, dichos métodos se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes criterios:

- Operación del transformador durante el secado: éste hace referencia a si el transformador se encuentra o no en funcionamiento durante el proceso de secado, es decir, si está on-line u off-line.
- Sitio de aplicación del método: con esto se determina si el proceso a realizar, de acuerdo a las condiciones de la instalación y de los equipos a utilizar, se puede hacer en el lugar de instalación del transformador o por el contrario, debe ser llevado a fábrica para finalizar el proceso.
- Tipo de medio circundante al aislamiento: este criterio hace referencia al tipo de elemento o sustancia empleada durante el secado, es decir, si se emplea aceite, aire, vacío o keroseno.
- Forma de aportar calor al aislamiento: es determinado a partir de la forma en que se aporta el calor al aislamiento sólido, lo cual ayuda a conseguir el desequilibrio termodinámico, logrando así la extracción más rápida del agua al interior del aislamiento sólido.

En la Figura 6 se hace referencia a los diferentes criterios empleados para la clasificación de los métodos convencionales de secado.

Figura 6. Criterios de clasificación de los métodos de secado convencionales.



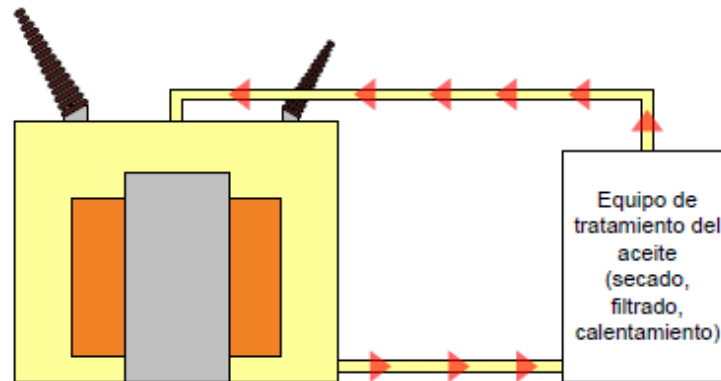
Tomado de (Garcia, 2013)

A continuación se hará una breve descripción de los métodos de secado comúnmente empleados en la actualidad.

2.4.1. Secado por circulación de aceite

Es un método empleado generalmente en campo. Consiste en la circulación continua de aceite caliente como la parte principal de secado, el aceite debe hacerse circular desde la parte inferior del tanque a través de un intercambiador de calor, a una temperatura de salida entre 60 °C y 90 °C, la principal ventaja de este proceso es que se puede realizar con el transformador energizado y en operación, lo que es ideal en este método, ya que si se hace con el transformador off-line la extracción de humedad es poco eficiente. En la Figura 7 se puede visualizar un esquema general del proceso (Cigré Brochure 227, 2003; Garcia, 2012).

Figura 7. Esquema general del proceso de circulación de aceite.



Tomado de (Garcia, 2012)

La migración de humedad hacia el exterior se da debido a la diferencia entre las concentraciones relativas de humedad de los dos tipos de aislamiento, el aumento del límite de saturación del aceite en conjunto con la disminución de adsorción de agua por medio del aislamiento sólido y el aumento en la presión de vapor de agua al interior del aislamiento. Debido a que el aceite tiene poca afinidad con agua, la velocidad de extracción de esta de los aislamientos es lenta (Garcia, 2012).

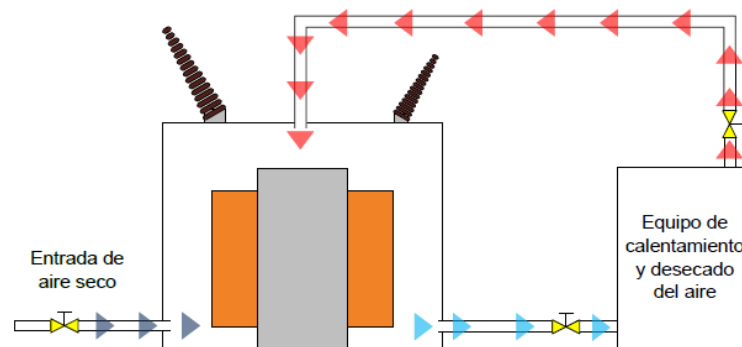
2.4.2. Secado por circulación de aire caliente

Este método se debe realizar con el transformador fuera de servicio y puede llevarse a cabo tanto en campo como en fábrica. Antes de llevarlo a cabo se debe desalojar el aceite del transformador, luego se hace circular aire caliente y seco, a una temperatura aproximada de 100 °C desde un equipo acondicionador externo. El tanque debe ser cubierto con el fin de reducir a un mínimo la cantidad de calefacción

requerida y el volumen de aire necesario para obtener una calefacción óptima debe ser más de 10 m³ por minuto por m² de la zona de la base del tanque. En la Figura 8 se puede observar un esquema general del método descrito (Cigré Brochure 227, 2003; Garcia, 2012).

La extracción de humedad del aislamiento se da debido a la diferencia de concentración relativa de humedad entre el aire y los aislamientos celulósicos y el calor aportado por el aire. La diferencia del método de aceite caliente con este es la velocidad de extracción de humedad, ya que este tiene una velocidad mayor debido a que el aire tiene mayor afinidad con el agua. Sin embargo, una desventaja del método es que durante el secado el papel puede degradarse por efecto de la oxidación.

Figura 8. Esquema general para el método de secado por circulación de aire caliente.



Tomado de (Garcia, 2012)

2.4.3. Secado por vacío con aplicación de calor

Para emplear este método se debe desalojar el aceite del transformador, luego se aplica al interior del mismo una presión inferior a la presión externa, la cual oscila entre 0.8 mbar y 1.2 mbar. Con ello se reduce la presión parcial del agua en el medio circundante al aislamiento. Si se calienta el aislamiento se incrementa la presión de vapor de agua al interior del mismo, forzando la migración de humedad desde el aislamiento sólido. La contribución de calor puede realizarse mediante la circulación de corriente por los devanados, haciendo circular aceite caliente antes de realizar el método de vacío o mediante la inyección de aceite caliente en forma de spray cuando ya se ha aplicado el vacío. La velocidad de extracción de humedad que ofrece el método de vacío es alta, sin embargo, la principal desventaja es que no induce el suficiente calor a los aislamientos que no están en contacto con los conductores, por lo que la extracción de agua de estos es difícil, adicionalmente si

la condición mecánica de la cuba del transformador no es la adecuada, al aplicar vacío puede colapsar lo que representaría un daño grave para la máquina (Garcia, 2012).

2.4.4. Secado por vapor de keroseno

Debido a la complejidad de los equipos requeridos para la realización de este proceso, su utilización se encuentra limitada a secados en fábrica. El método de secado consiste en someter a vacío los aislamientos del transformador y aplicarle vapor de keroseno caliente, con temperaturas entre 150 y 180 °C, el vapor de keroseno calienta el papel forzando la migración de agua hacia el exterior del mismo. Debido a la alta conductividad térmica del keroseno la transferencia térmica hacia el aislamiento es mayor lo que hace que la velocidad del secado sea alta (Garcia, 2012).

2.4.5. Calentamiento de baja frecuencia (LFH) como técnica coadyuvante en el proceso de secado

Como se ha mencionado anteriormente la temperatura de los aislamientos sólidos es factor determinante en la velocidad y la calidad del proceso de secado. Una forma de mejorar el aporte calórico a los aislamientos sólidos es hacer circular corrientes por los devanados del transformador, usualmente poniendo en cortocircuito uno de los devanados y alimentando con una tensión de alterna por otro. Sin embargo para el secado de transformadores de potencia en campo, a la frecuencia nominal, las fuentes requeridas para hacer circular corrientes en los devanados serían muy difíciles de disponer. Una alternativa a esta forma de calentar es el método de calentamiento por baja frecuencia o LFH (*Low Frequency Heating* por sus siglas en inglés).

El método LFH consiste en introducir una corriente controlada de baja frecuencia, inferior a 2 Hz, con bajos niveles de tensión, en uno de los devanados manteniendo los otros cortocircuitados. Esta inyección de corriente se suele realizar por medio de convertidores o variadores de frecuencia como los empleados en el control de motores. Este método ayuda a conservar la calidad del aislamiento, debido a que el calor es generado directamente en los devanados del transformador, el lugar indicado para extraer la humedad del aislamiento, teniendo en cuenta que la temperatura en ellos se puede controlar con precisión (Vuolle & Rindlisbacher, 2005).

3. DIMENSIONAMIENTO DE LA FUENTE LFH

El voltaje y la potencia de la fuente empleada en el proceso de secado con LFH, dependen directamente de la impedancia de cortocircuito del transformador, por esta razón la fuente que se debe emplear debe tener una corriente de baja frecuencia, debido a que la impedancia vista por dicha fuente, es la impedancia de cortocircuito del transformador, que es predominantemente inductiva, donde la componente mayor de dicha impedancia es la reactancia del transformador, la cual es directamente proporcional a la frecuencia de la señal de alimentación $X_L = 2\pi fL$. Es por esto, que al manejar una frecuencia baja el tamaño de la fuente disminuye notablemente, logrando así que el costo sea menor y facilitando a su vez el desplazamiento de la fuente en el momento que se requiera.

National Industry of Norway propuso las primeras plantas de LFH entre los años 1984 y 1987 (Vuolle & Rindlisbacher, 2005). Las plantas modernas de LFH utilizan un sistema de medición dual de temperatura que permite conocer la temperatura media alcanzada por los devanados de baja y alta tensión por separado, y asimismo generar el calentamiento del devanado de alta tensión. Con lo anterior se logra distribuir uniformemente la temperatura al interior de los arrollamientos, condición importante para el secado en campo de transformadores de potencia, además, con este sistema se pueden seleccionar temperaturas para el secado más elevadas, ya que se pueden controlar sin que generen sobrecalentamientos debido a los puntos calientes.

En la actualidad no existen fuentes específicas de uso comercial para el calentamiento a baja frecuencia o LFH. El primer paso para el diseño y construcción de una fuente LFH, es dimensionar la potencia y tensión en función de los posibles transformadores a los cuales se les aplicaría el calentamiento por baja frecuencia. Es importante tener en cuenta, que además de las características anteriores, dichas fuentes deben estar en capacidad de estimar la temperatura de los devanados y a partir de ésta, regular la frecuencia y magnitud de corriente necesarias para un óptimo secado, evitando un deterioro adicional del aislamiento sólido.

3.1. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA POTENCIA Y LA TENSIÓN DE LA FUENTE LFH

Para determinar los valores necesarios de tensión y potencia que debe tener la fuente LFH y cuyo rango de frecuencia propuesto estaría entre 0.2 Hz y 5 Hz, de acuerdo a la literatura consultada previamente, se usaron las características de algunos de los transformadores de potencia instalados en la región, éstas fueron: la

potencia nominal, las tensiones nominales, la impedancia de cortocircuito, las corrientes nominales, las pérdidas con carga y el grupo de conexión.

En el caso de las pérdidas con carga, no se logró obtener la información precisa para ninguno de los transformadores, razón por la cual se emplearon valores típicos, usando las referencias de pérdidas de algunos protocolos de pruebas disponibles. Para asignar los valores de pérdidas se tomó como referencia un transformador de igual o similar potencia con pérdidas conocidas.

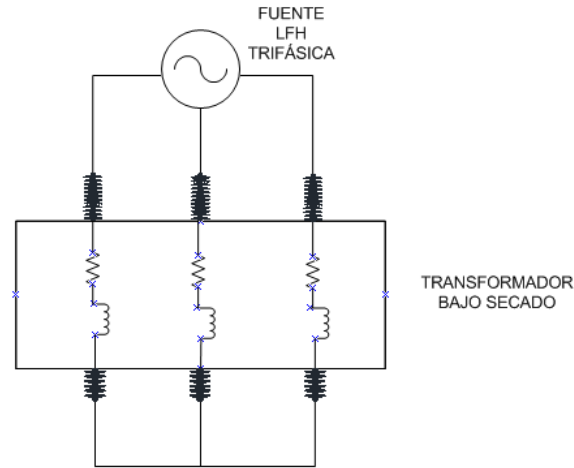
En la Tabla 5 se resumen las características principales y más críticas de los transformadores disponibles y en el Anexo I se detallan los datos empleados.

Tabla 5. Valores típicos de transformadores

CAPACIDAD (MVA)	TENSION AT (kV)	Z (%)	PÉRDIDAS CON CARGA (%)	CORRIENTE NOMINAL AT (A)
115	230	9.99	0.7	289
90	220	8.64	0.7	236
58.45	110	7.37	0.49	307
43.5	115	10.78	0.43	216
41.75	110	8.07	0.45	219
28	34.4	7.79	0.62	470
20	34.5	8.71	0.57	335

En la Figura 9 se puede observar un esquema básico equivalente de la conexión de la fuente LFH a un transformador trifásico durante el proceso de secado, en éste caso, independiente de la conexión de los devanados del transformador, se puede considerar que cada una de las fases tiene su respectiva impedancia de cortocircuito, la cual está conformada por una rama serie de resistencia y reactancia.

Figura 9. Diagrama esquemático de la conexión



De la Figura 9 se puede inferir que la resistencia para el caso de estudio se asumió igual a la resistencia de cortocircuito del transformador a la frecuencia nominal, ya que ésta no varía significativamente al disminuir la frecuencia a los valores empleados por la fuente LFH. La reactancia, la cual cambia su valor con la variación de frecuencia, se calculó a partir del valor obtenido de la inductancia de cortocircuito del transformador.

Para dimensionar la potencia y tensión de la fuente LFH, los pasos que se consideraron fueron los siguientes:

1. Cálculo de la resistencia de cortocircuito y reactancia de cortocircuito a la frecuencia nominal de operación del transformador, tanto en porcentaje como en por unidad (pu).

$$R_{cc}(\%) = P_{cc}(\%) \quad (1)$$

$$X_{cc} = \sqrt{(Z_{cc}^2 - R_{cc}^2)} \quad (2)$$

Donde,

$R_{cc}(\%)$: Resistencia de cortocircuito en porcentaje

$P_{cc}(\%)$: Pérdidas de cortocircuito en porcentaje

X_{cc} : Reactancia de cortocircuito a frecuencia nominal en porcentaje

Z_{cc} : Impedancia de cortocircuito a frecuencia nominal en porcentaje

R_{cc} : Resistencia de cortocircuito a frecuencia nominal en porcentaje

La ecuación 2 puede emplearse para obtener los valores tanto en porcentaje como en por unidad.

2. Cálculo de los valores en Ohm de la resistencia de cortocircuito y reactancia de cortocircuito, al igual que de la inductancia de cortocircuito propia para cada uno de los transformadores (en Henry) referidas al lado de alta tensión del transformador.

$$R_{cc}(\Omega) = R_{cc}(pu) * \frac{V_{n-1}^2}{S_n} \quad (3)$$

$$X_{cc_60Hz}(\Omega) = X_{cc}(pu) * \frac{V_{n-1}^2}{S_n} \quad (4)$$

$$L_{cc}(H) = \frac{X_{cc}(\Omega)}{2\pi f} \quad (5)$$

Donde,

$R_{cc}(\Omega)$: Resistencia de cortocircuito en Ohm

$X_{cc_60Hz}(\Omega)$: Reactancia de cortocircuito en Ohm a frecuencia nominal

$L_{cc}(H)$: Inductancia de cortocircuito en Henry

V_{n-1}^2 : Tensión nominal del transformador en el lado de AT

S_n : Potencia nominal del transformador

3. Cálculo de los valores de resistencia, reactancia e impedancia de cortocircuito, las potencias aparente, activa y reactiva y finalmente la tensión de línea para los valores mínimos y máximos de frecuencia de operación de la fuente LFH en el rango establecido anteriormente.

$$X_{cc_LFH}(\Omega) = 2\pi f_{LFH}L \quad (6)$$

$$Z_{cc_LFH}(\Omega) = \sqrt{(R_{cc}^2 + X_{cc_LFH}^2)} \quad (7)$$

$$S_f = 3 * I_n^2 * Z_{cc_LFH}(\Omega) \quad (8)$$

$$P_f = 3 * I_n^2 * R_{cc} \quad (9)$$

$$Q_f = 3 * I_n^2 * X_{cc_LFH} \quad (10)$$

$$U_f = \sqrt{3} * Z_{cc_LFH}(\Omega) * I_n \quad (11)$$

Donde,

$X_{cc_LFH}(\Omega)$: Reactancia de cortocircuito en Ohm de la fuente LFH

$Z_{cc_LFH}(\Omega)$: Impedancia de cortocircuito en Ohm de la fuente LFH

S_f : Potencia aparente de la fuente LFH

P_f : Potencia activa de la fuente LFH

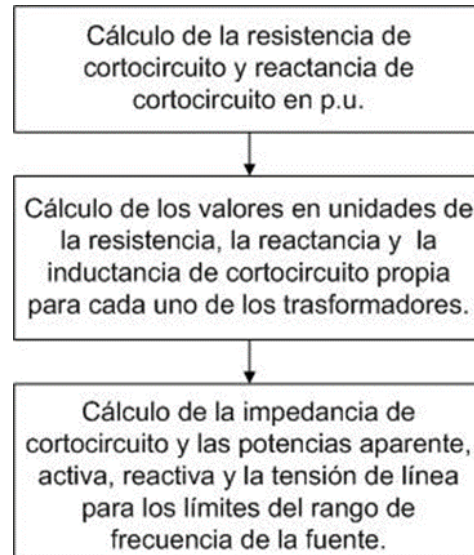
Q_f : Potencia reactiva de la fuente LFH

U_f : Tensión nominal de la fuente LFH

Cabe resaltar que, de acuerdo a los cálculos realizados, se espera que no sea inyectada por la fuente LFH más de la corriente nominal. En la Figura 10 se puede observar el resumen del procedimiento realizado para obtener los valores finales de

potencia y tensión estimados para la fuente LFH trifásica, de acuerdo al análisis anterior.

Figura 10. Proceso para el cálculo de los valores de la fuente LFH.



En la Figura 11 y la Figura 12 se pueden observar las características de potencia y tensión, respectivamente, obtenidas para la fuente LFH en el límite inferior del rango de frecuencia previamente establecido.

Figura 11. Característica de potencia para una frecuencia de 0.2 Hz, respecto a su capacidad nominal.

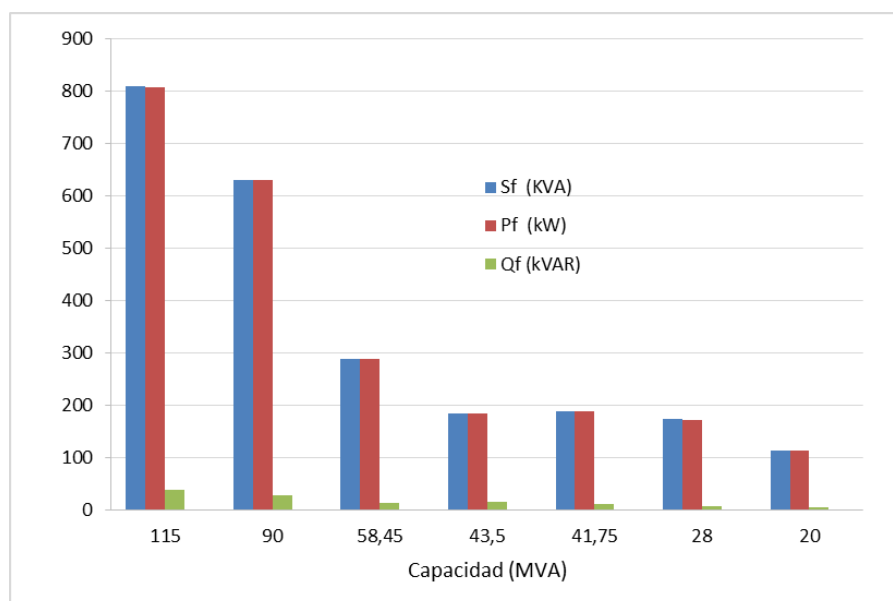
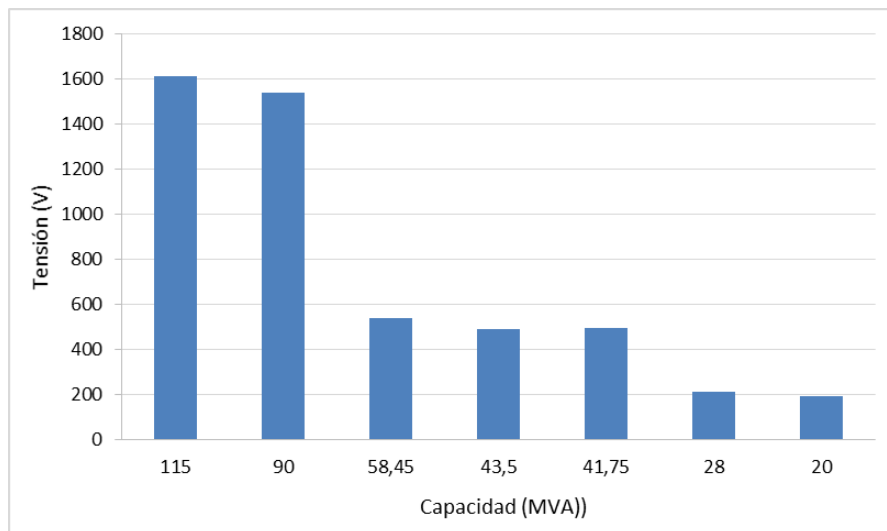


Figura 12. Característica de tensión para una frecuencia de 0.2 Hz, respecto a su capacidad nominal.



En la Figura 13 y la Figura 14 se pueden observar las características de potencia y tensión, respectivamente, obtenidas para la fuente LFH en el límite superior del rango de frecuencia previamente establecido.

Figura 13. Característica de potencia para una frecuencia de 5 Hz, respecto a su capacidad nominal.

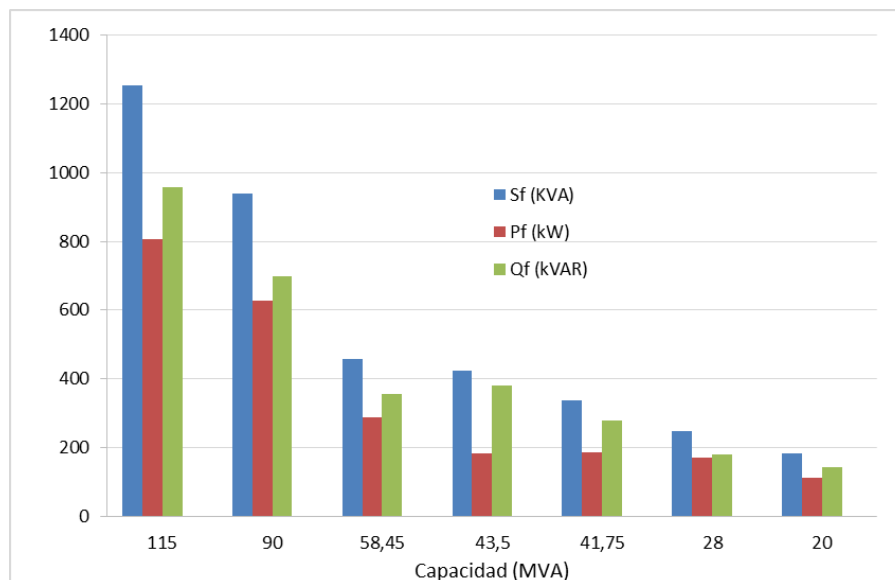
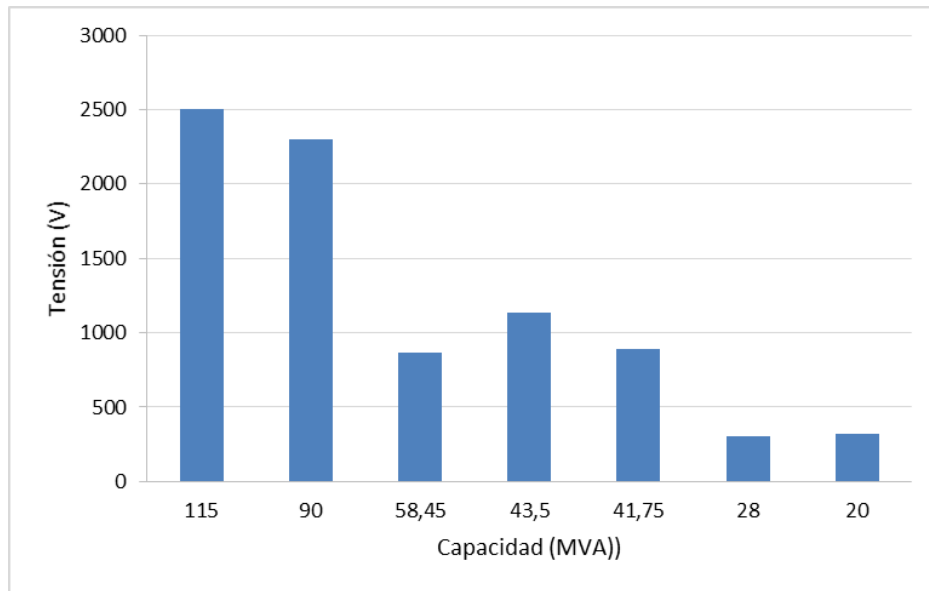


Figura 14. Característica de tensión para una frecuencia de 5 Hz, respecto a su capacidad nominal.



De la Figura 11 y la Figura 13 se pueden inferir, como es de esperarse, que a mayor potencia del transformador más altos serán los valores de tensión y potencia requeridos para la fuente LFH. Además, se puede observar que la cantidad de reactivos demandados a la fuente LFH a 0.2 Hz (ver Figura 11) es relativamente despreciable para todas las potencias de los transformadores, mientras que a 5 Hz (ver Figura 13) la cantidad de reactivos predomina sobre la potencia activa requerida de la fuente.

De la Figura 12 y la Figura 14 se puede concluir que la tensión aumenta significativamente con el aumento de la frecuencia. Se observa que para una frecuencia de 0.2 Hz la máxima tensión requerida para un transformador de potencia nominal 115 MVA es aproximadamente 1600 V, mientras que para una frecuencia de 5 Hz la tensión que se requeriría de la fuente sería 2500 V, es decir, se percibe un aumento de tensión superior al 50%.

A continuación, en la Figura 15 y la Figura 16 se pueden observar el comportamiento de potencias según la variación de frecuencia, mientras que en la Figura 17 y la Figura 18 se detallan los comportamientos de tensión en función de la variación de frecuencia, ambos para las capacidades límite de los transformadores bajo estudio, es decir, 20 MVA y 115 MVA respectivamente.

Figura 15. Comportamiento de potencia para un transformador de 20 MVA.

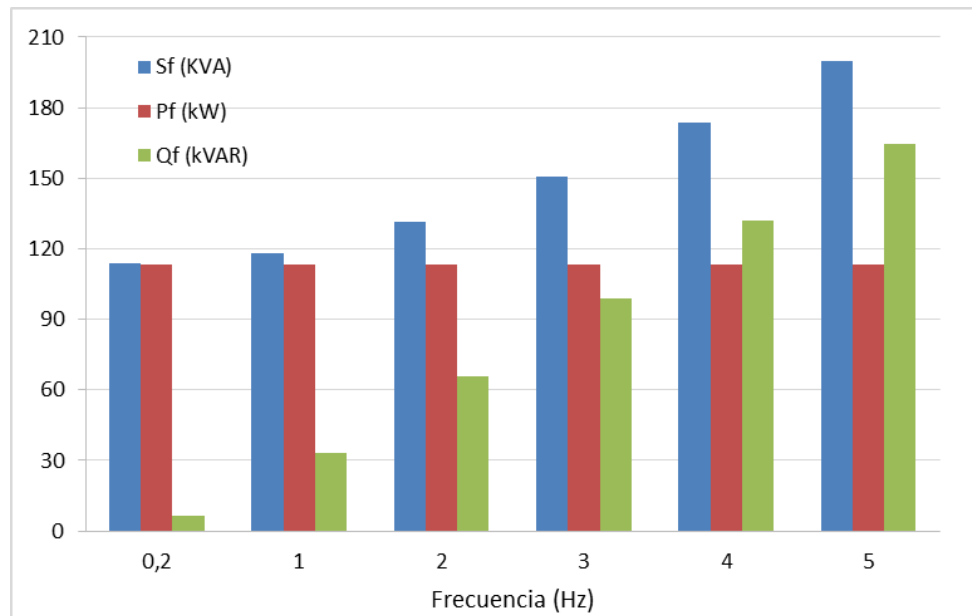


Figura 16. Comportamiento de potencia para un transformador de 115 MVA.

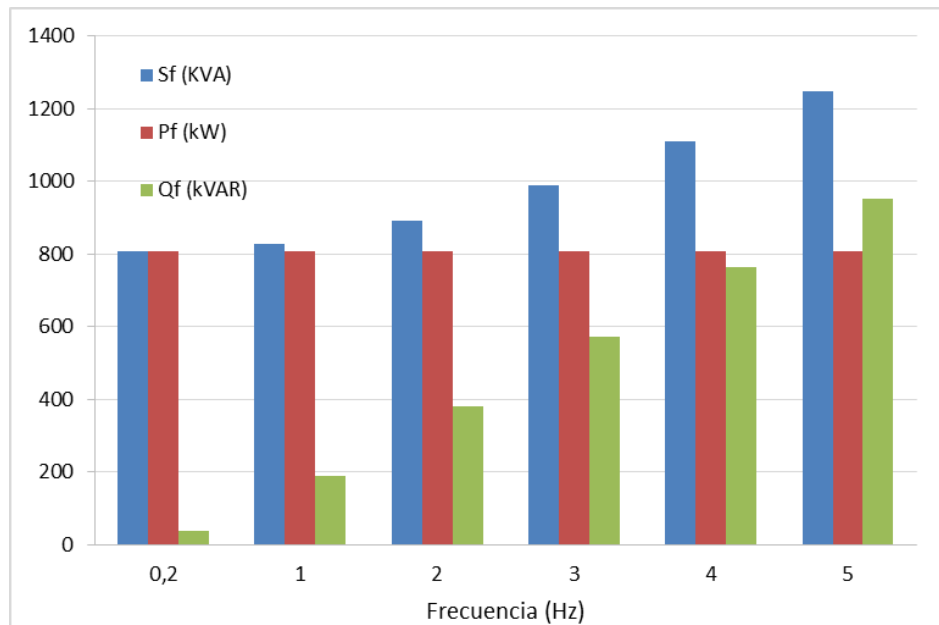


Figura 17. Comportamiento de tensión para un transformador de 20 MVA.

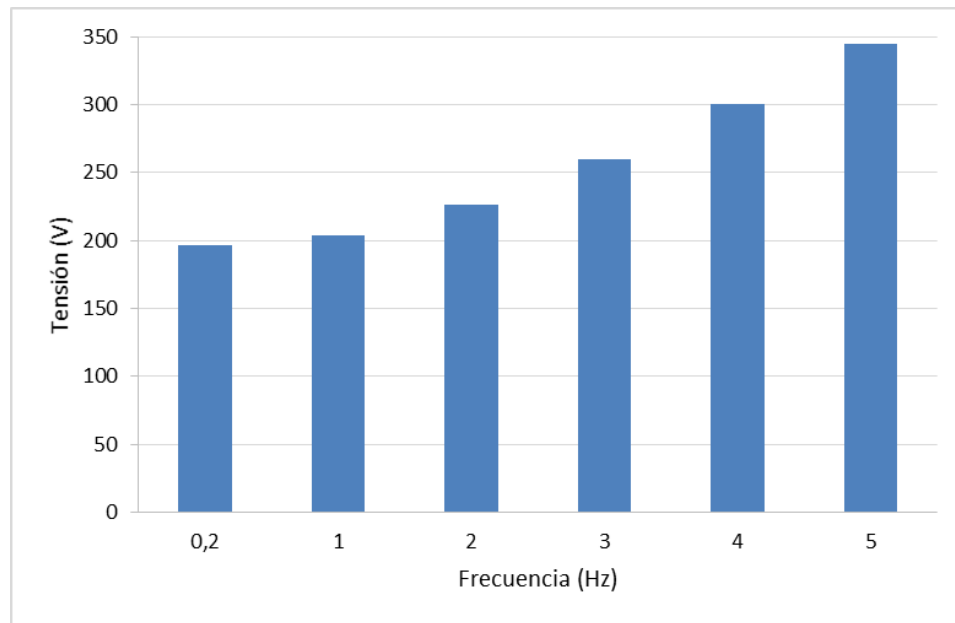
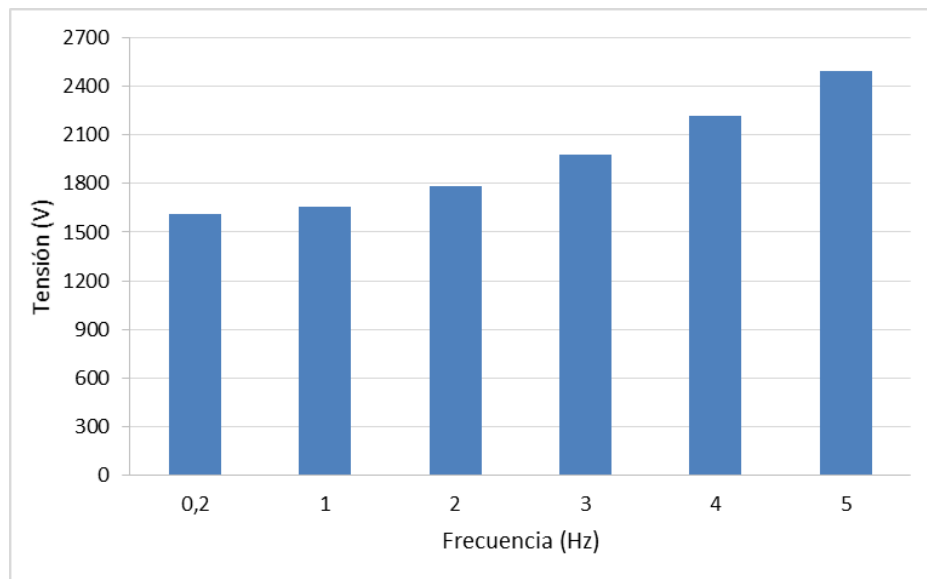


Figura 18. Comportamiento de tensión para un transformador de 115 MVA.



Como puede verse en la Figura 15 y la Figura 16, independientemente del valor de la capacidad del transformador empleado, al acercarse al límite superior del rango de frecuencia, los reactivos son preponderantes con respecto a la potencia activa.

Lo anterior puede influir, como es de esperarse, en el factor de potencia propio de la fuente.

En la Figura 17 y la Figura 18 se observa que la tensión incrementa significativamente al incrementar la frecuencia. Sin embargo, la elevación más alta en esta característica se tiene al elevar la capacidad del transformador. Se puede apreciar que en este caso puntual, al tener un transformador de 20 MVA la máxima tensión inyectada es de 350 V aproximadamente y en uno de 115 MVA la tensión máxima es cercana a 2500 V, es decir, que se percibe un aumento de 7 veces en el valor de la tensión.

De acuerdo a la alta cantidad de reactivos suministrados por la fuente cuando se tiene una frecuencia de 5 Hz, se analiza la opción de conectar al circuito un banco de condensadores trifásicos, los cuales pueden estar conectados en estrella o delta, y así verificar la disminución de la potencia reactiva y por ende de la potencia aparente de la fuente.

Para calcular los condensadores se tuvo en cuenta el siguiente orden:

1. Cálculo del factor de potencia

$$f.p = \frac{P_f}{S_f} \quad (12)$$

Donde,

$f.p$: Factor de potencia resultante

2. Cálculo de la nueva potencia reactiva Q_n , teniendo en cuenta que el nuevo factor de potencia deseado es 0.9 ($\theta_n=25.84^\circ$)

$$Q_n = P_f * \tan \theta_n \quad (13)$$

Donde,

Q_n : Potencia reactiva deseada de acuerdo al factor de potencia requerido

θ_n : Ángulo requerido para mejorar el factor de potencia al valor deseado

3. Cálculo de la potencia reactiva que debe suministrar en banco de condensadores Q_c

$$Q_c = Q_n - Q_f \quad (14)$$

Donde,

Q_c : Potencia reactiva que debe proporcionar el banco de condensadores

4. Cálculo del condensador $C(mF)$. Se debe tener en cuenta que el valor comercial elegido debe ser lo más cercano al valor teórico.

$$C = \frac{I_n^2}{w * Q_c} \quad (15)$$

Donde,

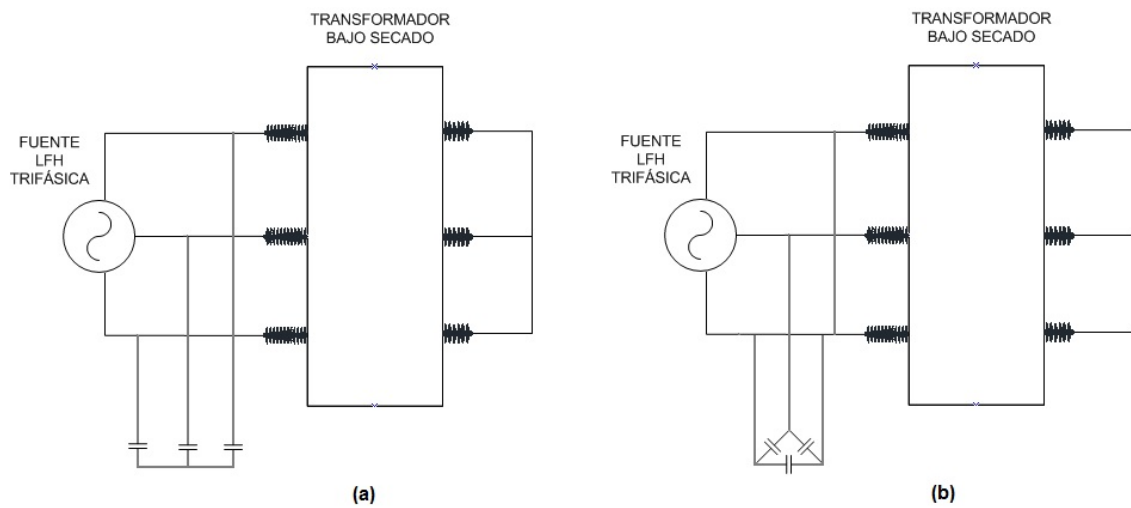
C : Valor del condensador requerido

w : Frecuencia variable en la fuente

Cabe aclarar que el análisis y cálculo realizado para los condensadores, es importante hacerlo en los valores más altos del rango de frecuencia establecido, ya que en valores inferiores el factor de potencia es aproximadamente 0.9. Los resultados completos para la frecuencia del límite superior, se consignan en el Anexo II y Anexo III para conexión en estrella y delta, respectivamente.

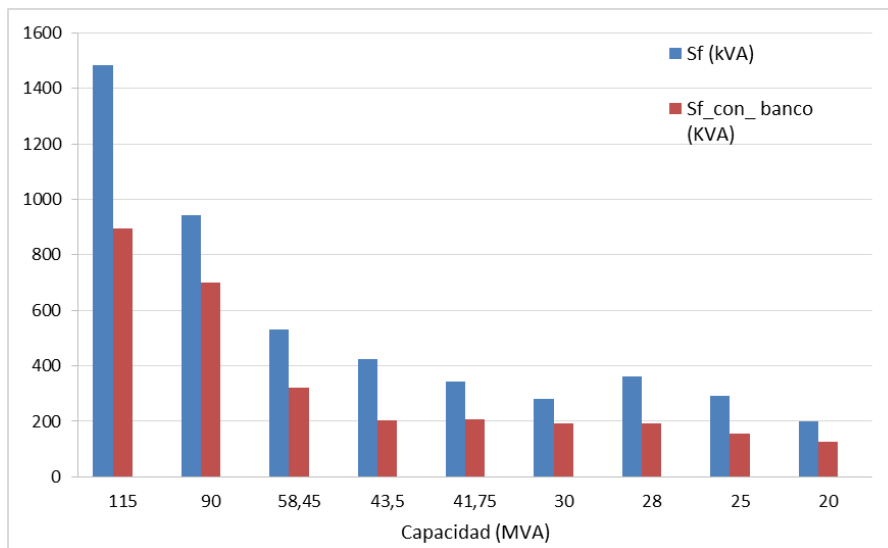
En la Figura 19 se establecen las conexiones que puede tener el banco de condensadores trifásico utilizado en el proceso, (a) Conexión en estrella y (b) Conexión en delta.

Figura 19. Conexión del banco de condensadores trifásico calculado.



En la Figura 20 se puede observar que al implementar un banco de condensadores trifásico ya sea en conexión estrella o delta, la potencia aparente que requiere la fuente disminuye notablemente.

Figura 20. Comportamiento de la potencia aparente con la conexión del banco de condensadores en estrella o delta.



Se debe tener presente que, aunque independientemente de la conexión realizada en el banco de condensadores, la potencia aparente mantiene su proporción en cuanto a la disminución final, la magnitud de un condensador conectado en estrella es 3 veces mayor a la magnitud de un condensador conectado en delta.

Además, al realizar una conexión en estrella la tensión requerida es la tensión de fase, mientras que para una conexión en delta la tensión que debe ser proporcionada es la tensión de línea. Es decir, que la relación de la tensión de acuerdo a la conexión deseada es:

$$V_{cY} = \frac{V_{c\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Los cálculos y el análisis realizado a lo largo de este capítulo, permiten concluir que para la construcción de una fuente LFH es requisito fundamental establecer el rango de frecuencia de trabajo. Los resultados demuestran que lo ideal es emplear la fuente LFH en valores bajos de frecuencia, esto con el fin, de reducir los valores de potencias aparentes y reactivas suministradas por la fuente, además de mejorar el factor de potencia. Asimismo, se debe tener presente la utilización de un banco trifásico de condensadores para la reducción de reactivos y de la potencia aparente de la fuente, en el caso que se vaya a emplear la fuente en valores altos de frecuencia. Lo anterior, con el objetivo de reducir las magnitudes de las características técnicas de la fuente y el volumen que ésta pueda tener.

3.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LA FUENTE LFH

De acuerdo a los cálculos realizados para la fuente LFH que se utilizaría en el secado de los transformadores de la región, se puede concluir que en el caso de que se vaya a realizar éste proceso en un transformador de 115 MVA, teniendo en cuenta que esta es la mayor potencia, la fuente debe suministrar una potencia aparente de 808.4 kVA, una activa igual a 806.8 kW y una reactiva de 49.9 kVAR, con una tensión 1.62 kV, esto para el caso de una frecuencia de trabajo igual a 0.2 Hz.

Si se desea realizar el secado a una frecuencia más alta, por ejemplo el límite máximo de 5 Hz, los valores de potencia serían, para la potencia aparente 1485.1 kVA, la potencia activa es 806.8 kW y la reactiva 1248.8 kVAR. La fuente debe ser capaz de suministrar 2.9 kV.

Los valores anteriormente mencionados son los que la fuente abastecería para el proceso de secado sin tener en cuenta una conexión de condensadores. En el Anexo IV se pueden observar los resultados para la muestra de transformadores estudiada.

4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL USO DEL LFH EN LOS PROCESOS CONVENCIONALES DE SECADO

Como se ha mencionado anteriormente, en la industria existen diversos procesos de secado convencionales para los transformadores. En éstos se manipulan de manera diferente los factores predominantes en dichos procesos, tales como: la temperatura, la presión y la duración del secado. Es importante tener presente que una de las principales variables a tener en cuenta para una extracción de humedad eficaz es la temperatura, ya que a menor cantidad de temperatura, mayor es el contenido de agua presente en los aislamientos celulósicos (Bélanger, 2003). Sin embargo, la temperatura también debe ser contralada, debido a que ésta contribuye al envejecimiento del transformador.

Otra característica fundamental durante los procesos de secado es el tiempo de extracción de agua al interior de ambos aislamientos. El tiempo que se demora en migrar el agua de un medio a otro es denominado tiempo de difusión (Bélanger, 2003) y depende del tipo de aislamiento que se esté tratando. Estos tiempos de secado dependen también de varios factores, como la humedad absorbida por el transformador y la profundidad de ésta, la velocidad del proceso utilizado y la temperatura del aislamiento (Diguero & Cano, 2012).

Cabe resaltar que a medida que el transformador envejece, éste acumula cierta cantidad de agua que es función del nivel de tensión de funcionamiento (Bélanger, 2003). Es por esta razón que se deben realizar los procesos de secado, en función de extraer la mayor cantidad de agua posible, teniendo presente que hay algunas normas que establecen valores mínimos de humedad, los cuales sirven como guía para determinar que un transformador se encuentra dentro de los límites estipulados.

Para el caso del aceite existen tres tablas importantes que deben considerarse para la evaluación y secado de éste. La (IEEE C57.152, 2013) establece las características recomendadas de diagnóstico, lo cual se puede ver en la Tabla 3. Por otro lado, en la norma (IEEE Std C57.106, 2006) se presentan los valores límite para uso continuo del aceite como aislante, estos valores se resaltan en la Tabla 4 y finalmente aunque la norma (IEEE Std 62, 1995) no está vigente, ésta detalla valores guía para una correcta interpretación del porcentaje de saturación de agua en el aceite, los cuales pueden ser observados en la Tabla 6.

Tabla 6. Guía de porcentajes para la interpretación del porcentaje de saturación de agua en el aceite.

% Water saturation of oil	Condition
0–5	Dry insulation
6–20	Moderate to wet. Lower numbers indicate fairly dry to moderate levels of water in the insulation, whereas values towards the upper limit indicate moderately wet insulation.
21–30	Wet
>30	Extremely wet

Tomada de (IEEE Std 62, 1995).

Para el papel también hay establecidos en la (IEEE Std 62, 1995) porcentajes de humedad, los cuales determinan la condición que tiene éste. En la Tabla 7 pueden verse dichos porcentajes.

Tabla 7. Guía para la interpretación del porcentaje de humedad para el papel seco en peso.

% Moisture by dry weight in paper	Condition
0–2	Dry paper
2–4	Wet paper
>4.5	Excessively wet paper

Tomado de (IEEE Std 62, 1995).

Los valores y porcentajes consignados en las tablas anteriores, sirven como base para verificar la eficiencia de los procesos de secado, ya que éstos reflejan el estado del aislamiento líquido y sólido.

Los métodos tradicionales de secado toman largos tiempos y pueden implicar calefacción y numerosos equipos, a pesar de ello, algunos procesos pueden solo

extraer la humedad parcialmente (Ba, 2013). Actualmente las diferentes empresas e investigadores, buscan que el secado de los transformadores sea realizado en un tiempo reducido, logrando aminorar costos durante la operación y llevando al transformador a una mayor duración de trabajo (vida útil). Es importante tener presente que el secado fundamental al interior del transformador se debe realizar en los aislamientos celulósicos, ya que son ellos los que tienen acumulado el mayor contenido de agua y son los más difíciles de reemplazar, en caso de necesitarse.

4.1. RENDIMIENTO DE LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE SECADO

Lo más relevante en la actualidad es optimizar los tiempos de secado on-line y off-line. Sin embargo, se iniciará éste análisis considerando la temperatura, los tiempos de secado y el contenido de humedad que se pueden obtener en fábrica de acuerdo a la investigación realizada en (Villarroel, Garcia, García, & Burgos, 2012), ya que estos son los valores de referencia para los secados realizados después de un tiempo significativo de servicio de un transformador.

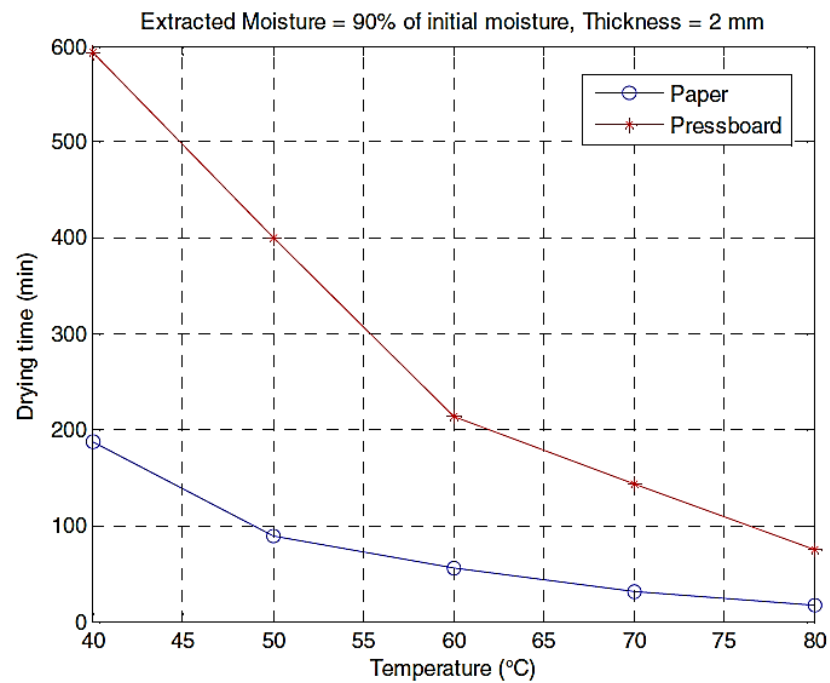
El estudio realizado por (Villarroel et al., 2012) considera diferentes espesores tanto en el papel Kraft como en el cartón prensado, simulando así, los aislamientos delgados y los aislamientos gruesos que se encuentran al interior del transformador. Las pruebas realizadas fueron llevadas a cabo usando un analizador termogravimétrico (TGA), el cual registra constantemente la pérdida de peso de las muestras de aislamiento. Las muestras de papel fueron humedecidas por 48 horas a una temperatura de 30 °C y una humedad relativa (HR) de 67.5%, mientras que las muestras de cartón prensado se humedecieron a 35 °C y una HR de 70%. El contenido inicial de humedad en las muestras, de acuerdo a las pruebas de Karl Fisher, fue de 7.5% en peso.

En la Figura 21 se puede observar el comportamiento que tiene un papel Kraft y el cartón prensado cuando tienen un espesor de 2 mm. Se puede ver que, como es de esperarse, en el cartón prensado el tiempo de extracción de humedad es mucho mayor al tiempo alcanzado con el papel. Por ejemplo, a 40 °C para que el papel tenga una humedad final de 0.5% se requiere un tiempo de 200 minutos, mientras que el cartón se demora 600 minutos. Si la temperatura es elevada al doble, es decir 80 °C, los tiempos de secado del papel y el cartón son 18 y 72 minutos respectivamente.

Por otro lado, en la Figura 22 se puede ver el comportamiento del papel Kraft y el cartón prensado cuando estos tienen un espesor de 3 mm. En este caso, el efecto de la temperatura es más notoria, ya que por ejemplo a una temperatura de 40 °C

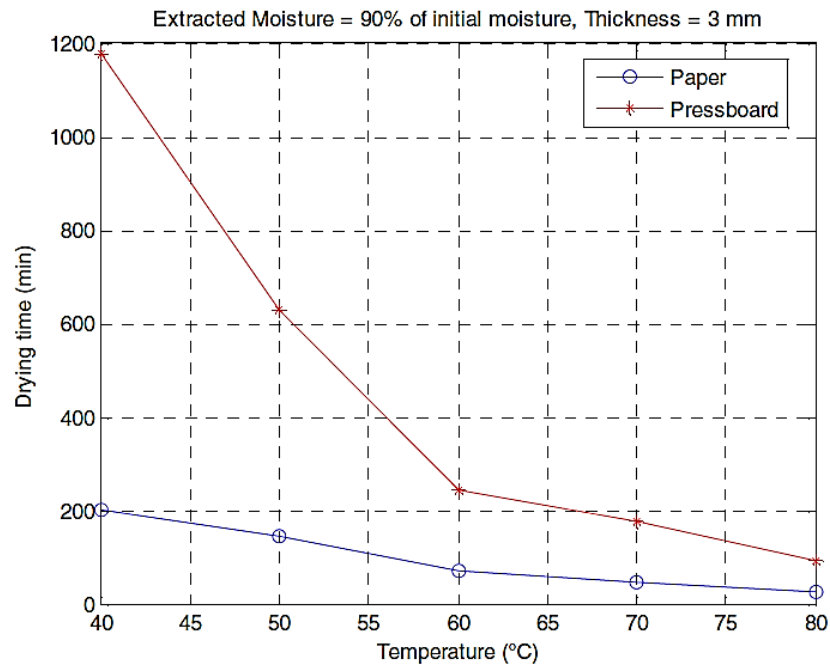
el cartón se demora 1176 minutos en llegar a un contenido de humedad de 0.5%, mientras que el papel tarda solamente 204 minutos. La diferencia en tiempos respecto a los dos materiales, es reducida al duplicar la temperatura aplicada, logrando un tiempo final de secado de 90 minutos para el cartón y de 30 minutos para el papel.

Figura 21. Evolución de la concentración de humedad en el papel y en el cartón prensado, espesor de 2 mm.



Tomado de (Villarroel et al., 2012)

Figura 22. Evolución de la concentración de humedad en el papel y en el cartón prensado, espesor de 3 mm.



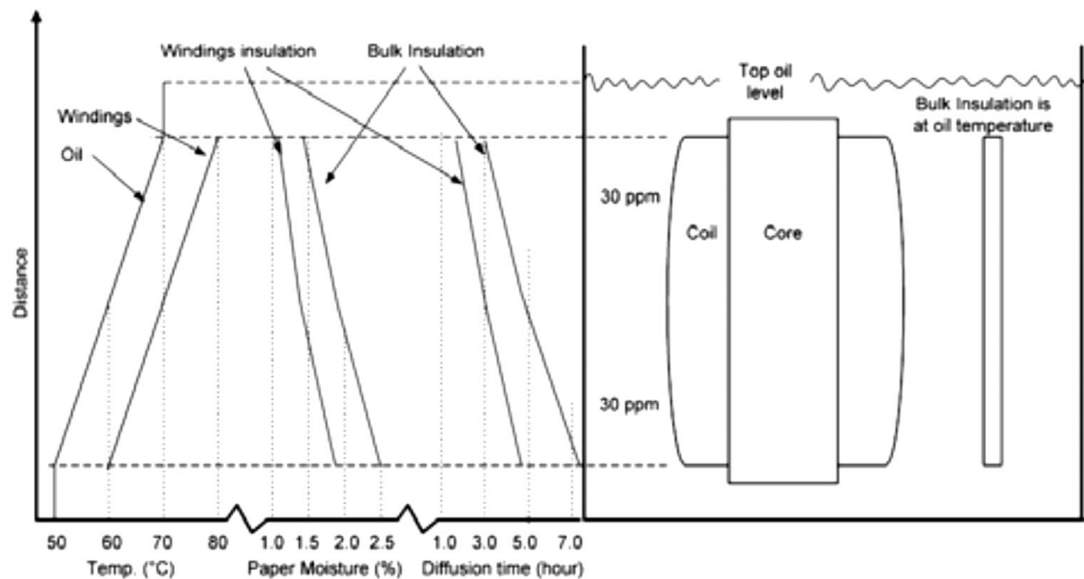
Tomado de (Villarrol et al., 2012)

Los comportamientos obtenidos en (Villarrol et al., 2012), reflejan la gran importancia que la temperatura tiene en los procesos de secado para lograr alcanzar valores aceptables de humedad en el papel y así evitar que con el paso del tiempo, la humedad no extraída se manifieste nuevamente en el transformador generando posibles fallas.

Ahora, cabe resaltar las diferentes investigaciones que algunos autores y empresas del sector han formulado y obtenido para procesos de secado en campo.

De acuerdo a (Bélanger, 2003) para un cartón prensado de 1 mm de espesor y un contenido de humedad de 0.5%, el tiempo de difusión a 20 °C es de 260 horas, mientras que si se eleva la temperatura a 70 °C, el tiempo se reduce a 5 horas. En la Figura 23, se puede observar el comportamiento que tiene un transformador respecto al porcentaje de humedad presente en él y el tiempo de difusión, en dicha figura el eje distancia representa la altura desde el fondo del tanque.

Figura 23. Caso de perfil de humedad como una función del perfil de temperatura del aceite dentro de un transformador.



Tomado de (Bélanger, 2003).

De la Figura 23 se puede deducir que la temperatura máxima a la que llega el aceite es 70 °C y los devanados a 80 °C, es decir, que la temperatura promedio del tanque del transformador es 60 °C. Por otra parte, el aislamiento de los devanados pasa de un contenido de humedad inferior al 2% a un 1%, en un tiempo aproximado de 5 horas. Mientras que el aislamiento grueso teniendo un 2.5% de humedad inicial, logra disminuir hasta un valor un poco inferior al 2%, en un tiempo de 7 horas. Esto es de esperarse, debido a que el aislamiento grueso posee la menor temperatura al interior del transformador, por lo tanto, tiene el mayor contenido de humedad y es difícil extraer una cantidad de agua similar a la de los aislamientos delgados.

Un caso práctico fue llevado a cabo por (Bélanger, 2003) donde emplearon un transformador de 9.3 MVA, ONAN / ONAF, 13.2 / 0.624 kV, 16.000 litros. El nivel de humedad inicial era de 4.4%. Se realizó un proceso de secado de circulación de aceite caliente durante un tiempo aproximado de 3 meses debido a inconvenientes de temperatura, ya que durante el proceso la temperatura del ambiente estaba por debajo de los 0 °C. Al final del secado se extrajeron 6.2 litros de agua aproximadamente, con una temperatura promedio en el aceite de 40 °C, con ello se logró que el agua disuelta en el transformador pasara a ser de 38 ppm a 18 ppm, una notable reducción a pesar del largo tiempo del proceso realizado.

Por otro lado, se menciona en (Ba, 2013) que en el caso de un transformador de 1500 litros secado por circulación de aceite caliente, éste puede tardar hasta dos horas para llegar a un valor de temperatura de 80 °C. Además, la eliminación de 40 ppm de agua tomará otras cuatro horas y para llegar a 5 ppm se llevarán seis horas adicionales. Es decir que el proceso para este transformador estará alrededor de 12 horas. El punto recomendado de corte según éste investigador es de 8 a 10 ppm. En el caso en que el proceso de secado no se lleve a cabo efectivamente, el agua quedará al interior del aislamiento sólido, por lo tanto al poner en funcionamiento el transformador, éste puede elevar su contenido de humedad en el aceite nuevamente hasta 50 ppm, razón por la cual el proceso deberá repetirse.

Otra publicación (ABB, 2003) detalla que a mayor nivel de tensión en el transformador, más problemas de humedad existen y es aquí donde se debe tener mayor cuidado. ABB resalta dos mecanismos para la realización del secado, el primero es la utilización de calor interno y el segundo calor interno junto a vacío.

Para cualquier método empleado, el proceso de secado no demora menos de 72 horas y en algunos casos el tiempo total puede llegar a las 5 semanas. Claro está que, el tiempo de extracción de humedad depende del método utilizado, la tensión y el tamaño del transformador (ABB, 2003).

Como ya se conoce, es importante inyectar el calor suficiente a los devanados para así, lograr elevar la temperatura en los aislamientos celulósicos y favorecer la migración de agua hacia el aceite. La cantidad de ciclos de vacío y calentamiento necesarios para obtener un secado óptimo, debe ser mínimo de 3. Sin embargo, se pueden llegar a aplicar hasta 8 ciclos dependiendo de las condiciones del transformador a secar, ya que éste debe ser capaz de tolerar ciclos completos de vacío, debido a los grandes esfuerzos mecánicos por los que pasa un transformador durante esta etapa.

La idea de trabajar con ambos métodos, es lograr mantener una temperatura en los devanados entre 80 °C y 90 °C por medio de una corriente, cuyo valor puede llegar a ser hasta una quinta parte de la corriente nominal. Con todo esto y de acuerdo a lo establecido por (ABB, 2003), el tiempo mínimo para cualquier transformador de potencia en un secado es de una semana independiente al método de secado empleado.

En (Almendros-Ibaez, Burgos, & Garcia, 2009) se presenta un análisis sobre dos métodos de secado empleados frecuentemente en la actualidad, circulación de aceite caliente (HO) y vacío con aplicación de espray de aceite caliente (HOS), los

cuales son estudiados y comparados en cuanto a su eficiencia. Ésta depende principalmente de la distribución de temperaturas al interior del transformador, ya que si no es homogénea, partes del aislamiento sólido estarán húmedos, para después de un tiempo liberar estas cantidades de agua nuevamente.

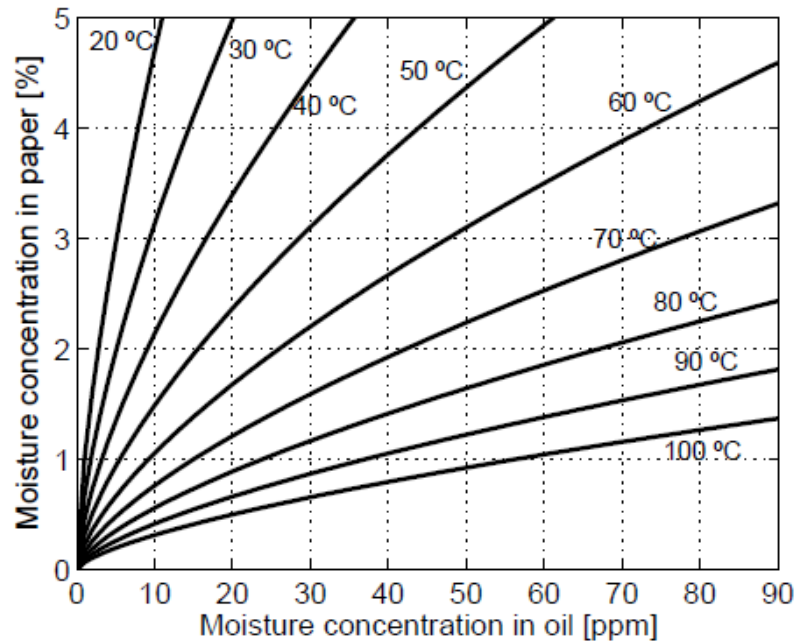
El análisis realizado varía de acuerdo al espesor del papel y de la temperatura aplicada, los casos de estudio se desarrollan para métodos off-line. Cabe resaltar que, durante los procesos de secado el contenido de humedad en el papel se dirige hacia la superficie que está en contacto con el aceite, donde el agua es absorbida por el mismo.

Para realizar el modelamiento de los procesos de secado en (Almendros-Ibaez et al., 2009), los autores establecen ciertas suposiciones:

- La difusión de la humedad es un proceso lento, debido a que el agua viajará a través del papel hasta alcanzar la superficie de éste donde será absorbido por el aceite.
- La altura de la parte activa del transformador, es generalmente más de un metro, mientras que el espesor del aislamiento en un transformador real es sólo unos pocos milímetros de espesor.

Además, es importante manifestar que entre el aceite y el papel, existe una condición de equilibrio entre la cantidad de agua del aceite, del aislamiento sólido y de la temperatura aplicada a ambos. Esta condición de equilibrio se puede apreciar en la Figura 24.

Figura 24. Condición de equilibrio entre el papel-aceite.



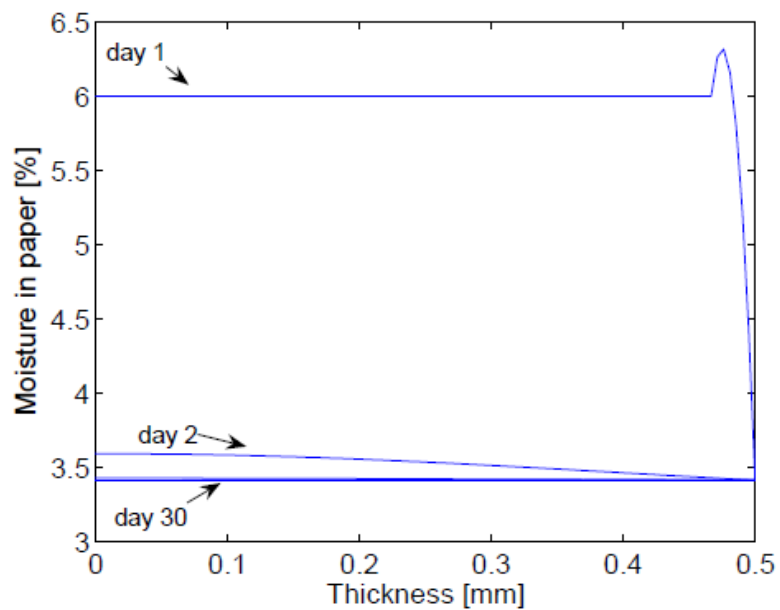
Tomada de (Almendros-Ibaez et al., 2009)

La concentración de equilibrio es la concentración de agua mínima que se puede alcanzar en el aislamiento y depende de la presión parcial del agua y de la temperatura alcanzada.

En la investigación de (Almendros-Ibaez et al., 2009) se presenta, entre otras, la importancia que tiene el espesor del papel en los tiempos de secado. Para las simulaciones realizadas se toma como condiciones iniciales, la humedad en el papel es 6% y en el aceite de 20 ppm, mientras que la temperatura constante es igual a 40 °C. Si tomamos como referencia las gráficas de equilibrio de la Figura 24 la humedad de equilibrio para este caso de estudio sería de 3.5%. De acuerdo a esto, se puede establecer que a pesar de llegar a este valor final de humedad, el aislamiento seguiría húmedo, teniendo como referencia lo estipulado en (IEEE Std 62, 1995).

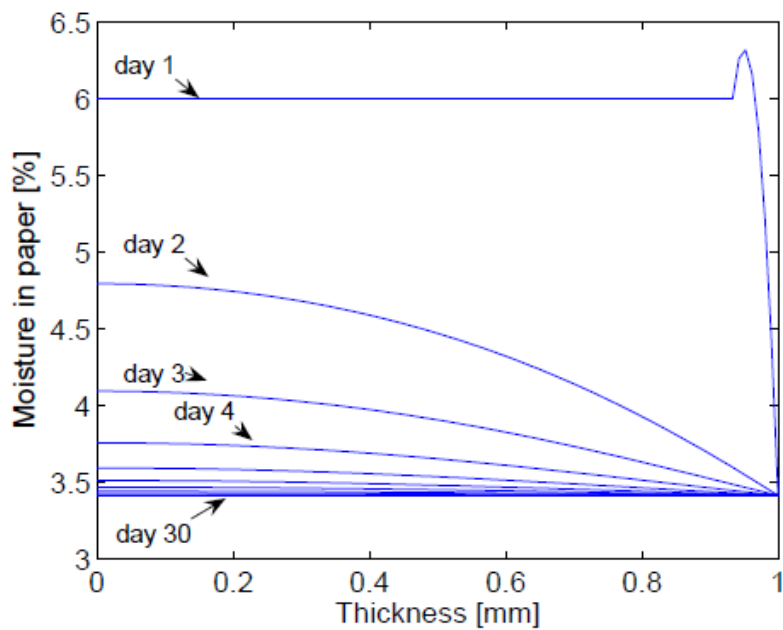
El análisis realizado se desarrolla para tres espesores diferentes de 0.5, 1 y 3 mm. A continuación se indican los comportamientos obtenidos para cada uno de los espesores estudiados después de 30 días de secado. En la Figura 25, la Figura 26 y la Figura 27 se puede observar la simulación realizada para los tres espesores mencionados anteriormente.

Figura 25. Evolución del contenido de humedad para un papel de 0.5 mm.



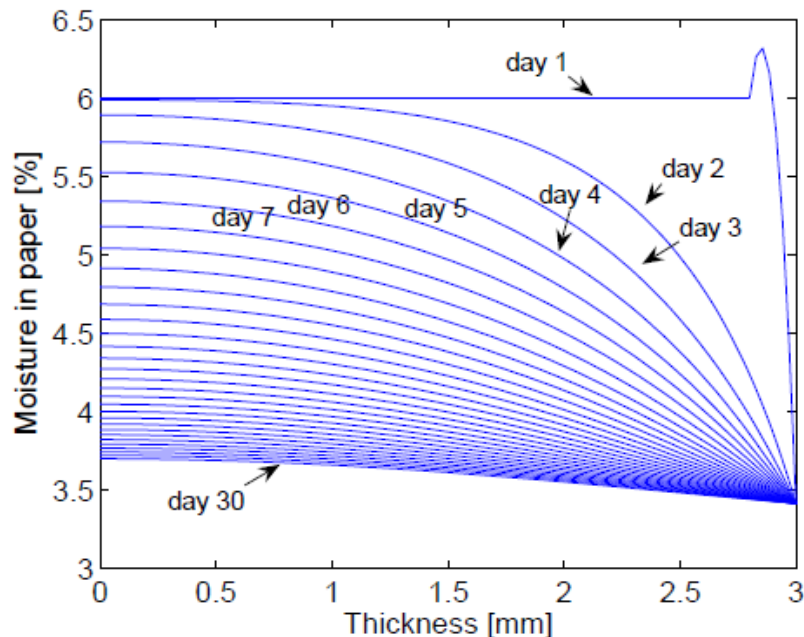
Tomado de (Almendros-Ibaez et al., 2009)

Figura 26. Evolución del contenido de humedad para un papel de 1 mm.



Tomado de (Almendros-Ibaez et al., 2009)

Figura 27. Evolución del contenido de humedad para un papel de 3 mm.



Tomado de (Almendros-Ibaez et al., 2009)

En la Figura 25 y la Figura 26 se puede ver que después de pocos días, cuatro y ocho respectivamente, de secado los aislamientos alcanzan la condición de equilibrio, cuyo valor está por debajo del 3.5%. Sin embargo, el valor de humedad final está por encima del valor establecido en la norma (IEEE Std 62, 1995), es decir que el aislamiento y por ende el transformador siguen húmedos.

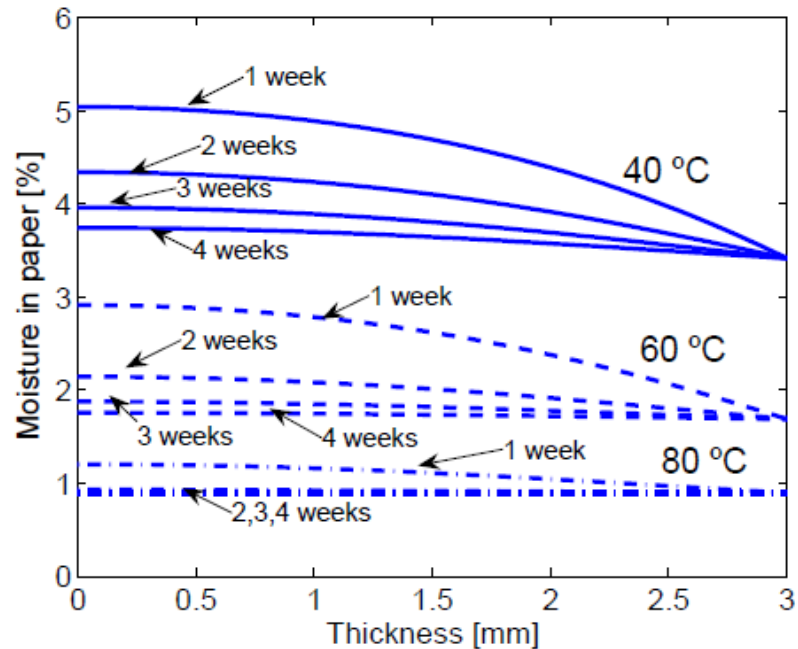
En la Figura 27 se aprecia notablemente que el aislamiento de 3 mm a pesar de estar sometido al proceso durante 30 días no puede llegar a su condición de equilibrio, obteniendo una humedad final cercana al 3.7%.

Como se mencionó anteriormente, además del espesor del papel, la temperatura es otro factor significativo para cualquier método de secado empleado. Es por ello que (Almendros-Ibaez et al., 2009) simuló una pieza de aislamiento sólido de 3 mm de espesor a tres temperaturas diferentes, con valores de humedad iniciales de 6% y 20 ppm. Se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 28.

La Figura 28 expone la influencia de la temperatura sobre las concentraciones de equilibrio de humedad. Si detallamos el secado después de cuatro semanas, se puede ver como a una temperatura de 40 °C la humedad solo ha disminuido a un valor un poco menor al 4%, mientras que a 80 °C, en el mismo tiempo de

comparación el papel está casi seco, manteniendo un valor inferior al 1%. Igualmente puede observarse que, a una temperatura de 40 °C la humedad de equilibrio no se logra, mientras que a temperaturas de 60 °C y 80 °C, la condición de equilibrio se obtiene en 1.69% y 0.89% respectivamente.

Figura 28. Evolución del proceso de secado durante 4 semanas a diferentes temperaturas.



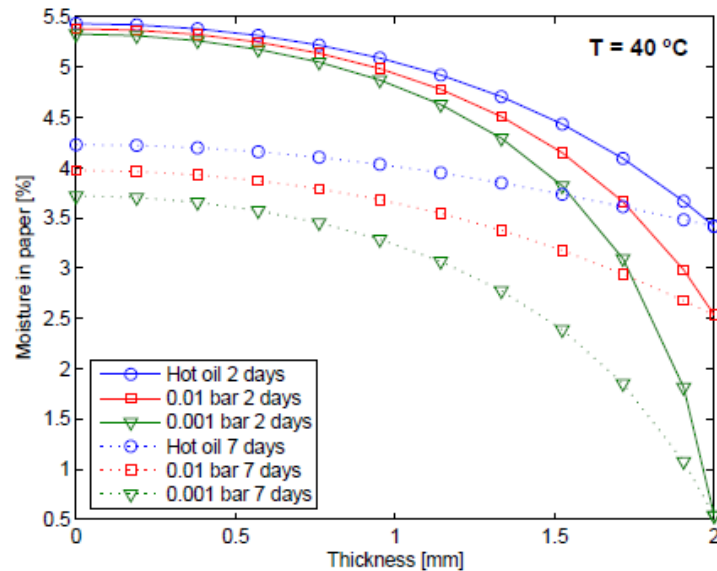
Tomado de (Almendros-Ibaez et al., 2009)

Cabe resaltar, que la temperatura en el aceite y el papel no es igual, solo el papel superficial logra tener la temperatura del aceite, debido a que al interior del aislamiento celulósico la temperatura es no homogénea. Por esta razón un transformador después de haber sido sometido a un proceso de secado, puede, después de unos meses de operación volver a expulsar el agua retenida en el papel hacia el aceite, quedando de nuevo expuesto a los altos índices de humedad. Ésta es la razón por la que el proceso de secado debe realizarse lo mejor posible, por medio de la inyección de calor a los devanados.

Además de lo anterior, otro factor importante durante el secado mediante vacío de un transformador es el nivel de vacío aplicado, lo cual se puede contemplar en la Figura 29 y Figura 30.

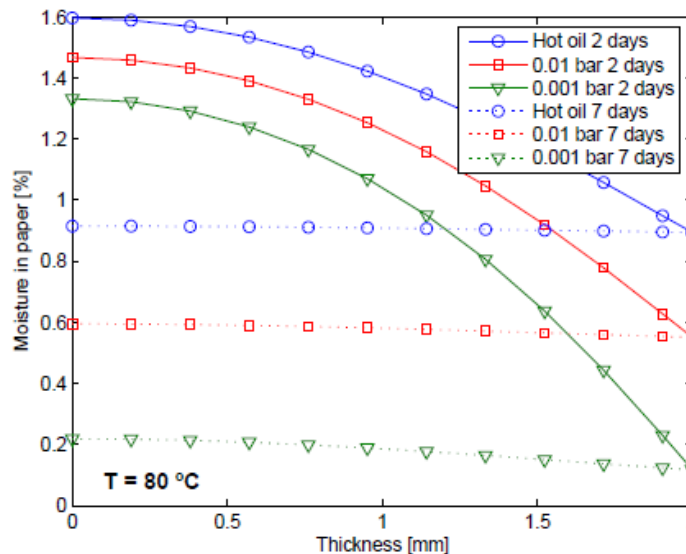
Para las simulaciones de la Figura 29 y Figura 30 se utilizó una pieza de papel de 2 mm con un contenido de humedad inicial del 6%. De acuerdo a las dos figuras anteriores, se puede observar como a niveles altos de vacío (bajos niveles de presión) se obtienen valores de humedad más bajos, debido a que la humedad de equilibrio disminuye.

Figura 29. Spray de aceite caliente vs Aceite caliente a 40 °C



Tomado de (Almendros-Ibaez et al., 2009)

Figura 30. Spray de aceite caliente vs Aceite caliente a 80 °C



Tomado de (Almendros-Ibaez et al., 2009)

Como es de esperarse, cuando el aislamiento está expuesto por 7 días a una temperatura de 80 °C, éste alcanza una humedad inferior que cuando se expone a una temperatura de 40 °C la misma cantidad de tiempo.

En ambos casos, al utilizar el método de HOS se logra extraer una mayor cantidad de agua que al aplicar HO. Cuando se suministra una temperatura de 40 °C, se obtiene una mayor diferencia entre los porcentajes de humedad, siendo estos 3.5% y 0.5% respectivamente para HO y HOS. Sin embargo, al aumentar la temperatura a 80 °C la humedad disminuye en ambos casos a valores de 0.9% y 0.2% para HO y HOS respectivamente. Esto lleva a afirmar, que el proceso de secado es lento e ineficiente a bajas temperaturas, independiente de la aplicación de un alto vacío.

4.2. RENDIMIENTO CON LA INCLUSIÓN DEL LFH EN LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE SECADO

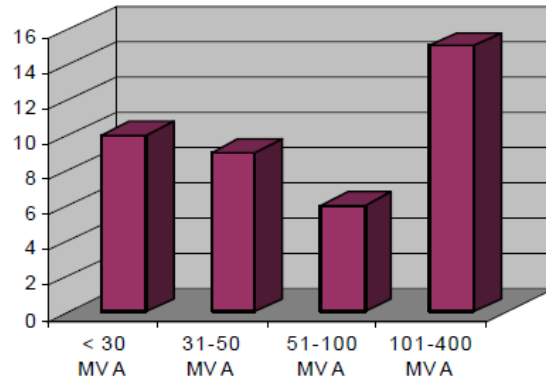
Como se ha mencionado anteriormente los procesos de secado en los transformadores de potencia son de vital importancia para su correcto funcionamiento y una larga vida de operación. Es por esta razón que diversos investigadores han estudiado el proceso del LFH, debido a que por medio de éste se logra reducir notablemente el tiempo durante el secado, lo cual es directamente proporcional al dinero invertido en éste.

Los procesos convencionales para el secado de transformadores pueden tardar varias semanas sin ser lo más óptimos posibles, debido a las mismas condiciones de los elementos empleados (por ejemplo, la condición hidrófoba del aceite), es por ello que se suelen fusionar diferentes métodos de secado para así mejorar la eficiencia de estos. Es aquí donde el LFH se ha convertido en una técnica coadyuvante para los métodos convencionales, debido a que con éste se logra aportar calor directamente a los devanados y por ende también al aislamiento sólido, generando así la movilidad del agua interna de estos hacia el aceite, facilitando la extracción del agua de ambos aislamientos.

Durante el año 2004 algunos investigadores de la empresa de ABB de Noruega y ABB y Micafil de Suiza, realizaron procesos de secado aplicando la tecnología LFH a más de 40 transformadores monofásicos de potencia, cuyos rangos de potencia y tensión variaban de 6 MVA/12,5 kV a 400 kV/400 MVA, lo cual puede verse en la Figura 31. De acuerdo a las necesidades y el proceso de control empleado, los resultados obtenidos al final del secado pueden variar del 1.5% al 0.5% de humedad residual en el aislamiento. El nivel de humedad dirigida depende de: nivel de tensión del transformador, la edad, nivel de humedad inicial y la posibilidad de re-sujeción

de los bobinados después del secado (Koestinger, Aronsen, Boss, & Rindlisbacher, 2004).

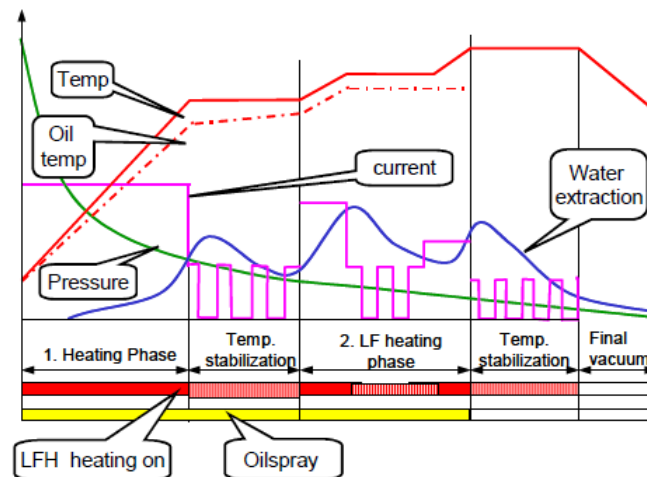
Figura 31. Transformadores de potencia secados en campo con la tecnología LFH.



Tomado de (Koestinger et al., 2004)

Al final del proceso de secado de los 40 transformadores se logró una extracción total de agua menor al 1.5%, durante este no se observaron bobinados sueltos. Adicionalmente, los devanados que se secaron y se prensaron al mismo tiempo durante la fabricación muestran menos encogimiento al terminar el proceso de secado. Como se ha descrito antes, la temperatura de secado además del vacío, es el parámetro más importante sobre el resultado y el tiempo de secado. La temperatura también influye en la despolimerización de material de aislamiento, por lo tanto un control óptimo de temperatura es esencial. El proceso de secado utilizando secado LFH se controló en tres pasos de temperatura diferentes como se puede apreciar en la Figura 32 (Koestinger et al., 2004).

Figura 32. Proceso de secado de aerosol de aceite caliente con LFH.



Tomado de (Koestinger et al., 2004)

Paso 1: a baja temperatura (70 - 80 °C) con el fin de extraer la mayor cantidad de agua posible en una etapa temprana para limitar el efecto de envejecimiento.

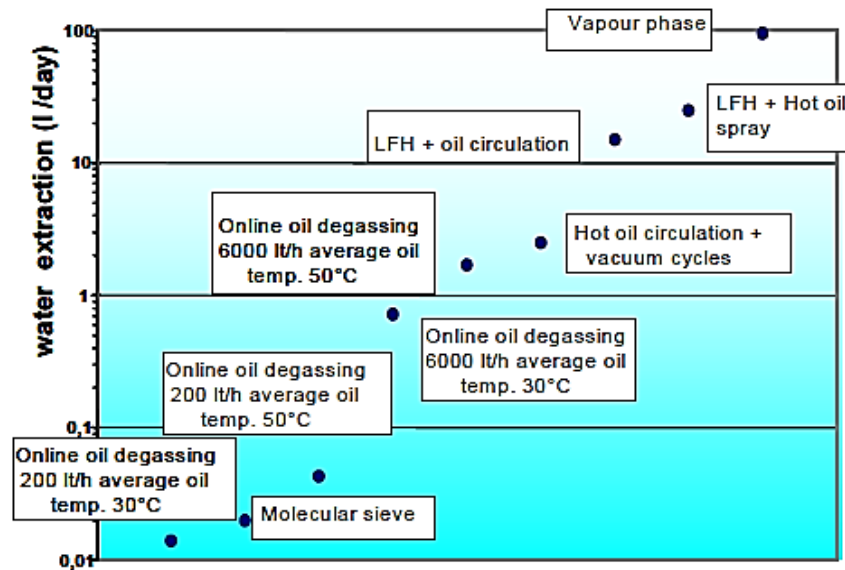
Paso 2: en el nivel intermedio. Normalmente la temperatura se elige de acuerdo a la máxima temperatura del aceite (80 - 95 °C).

Paso 3: se obtiene la temperatura final de secado (90 – 115 °C). En este paso, todo el aceite es drenado desde el transformador y sólo calefacción LFH está activo.

Durante la última etapa, las partes más gruesas de aislamiento se secan. A medida que el secado tiene lugar bajo vacío, casi no hay oxígeno presente, esta técnica reduce el efecto de envejecimiento a un valor muy bajo. Debido a la ausencia de oxígeno y a temperaturas de secado más altas, la correcta selección de la temperatura en relación con el contenido de humedad en el aislamiento y el bajo contenido de agua en la etapa de secado final reduce considerablemente el envejecimiento del aislamiento, así como el tiempo de secado.

En la Figura 33 se puede observar la velocidad que tiene cada uno de los diferentes procesos de secado en términos de litros de agua extraída/por día. De acuerdo a ésta gráfica los métodos con mejor extracción de agua en l/día son la circulación de aceite caliente + LFH (aproximadamente 15 l/día), seguido del método del spray de aceite caliente + LFH (cerca de 25 l/día) y finalmente con el secado por vapour phase la extracción es de alrededor de 100 l/día, sin embargo como se mencionó anteriormente, éste método no suele emplearse mucho debido a que por los equipos necesarios para éste solo puede ser aplicado en fábrica.

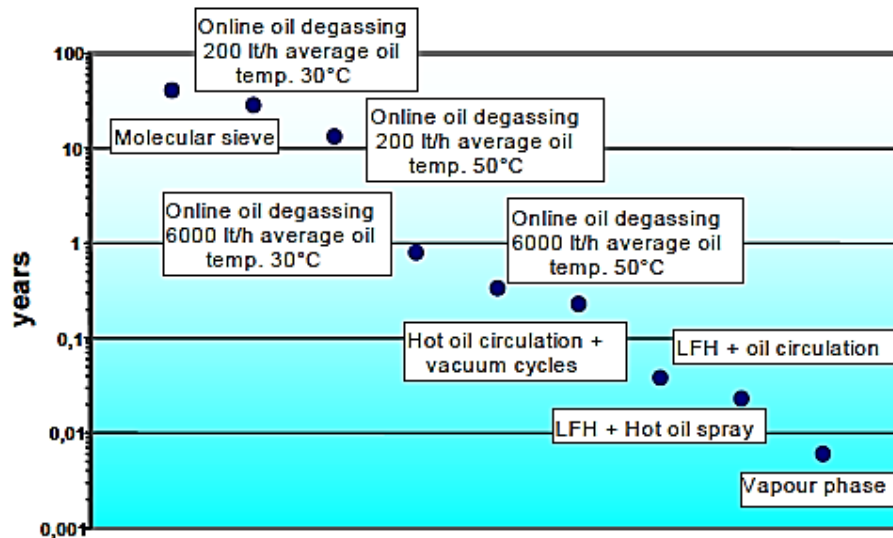
Figura 33. Velocidad de secado para diferentes métodos, desde un 3% de humedad hasta un 1.5%.



Tomado de (Koestinger et al., 2004)

En la Figura 34 se muestra la duración estimada para un transformador de 400 MVA con una humedad inicial del 3% llegando a un valor final del 1.5%. Como es de esperarse el menor tiempo requerido para obtener el porcentaje final de humedad, es conseguido con los métodos circulación de aceite caliente y spray de aceite caliente, ambos en adición con el LFH, obteniendo un tiempo final cercano de 0.04 años (28.8 días aprox.) y 0.02 años (14.4 días aprox.) respectivamente. Adicional a lo anterior, por medio de secado de vapor de keroseno se logra un tiempo inferior de 0.005 años, es decir 3.6 días aprox. Igualmente, aunque el método de secado por circulación de aceite caliente en adición con el vacío tiene un tiempo un poco mayor en comparación con los descritos anteriormente, éste logra obtener el mismo porcentaje final de humedad en menos de un año, aprox. 0.2 años (144 días).

Figura 34. Tiempo de secado a un transformador de 400 MVA con diferentes métodos, desde con un 3% de humedad hasta un 1.5%.

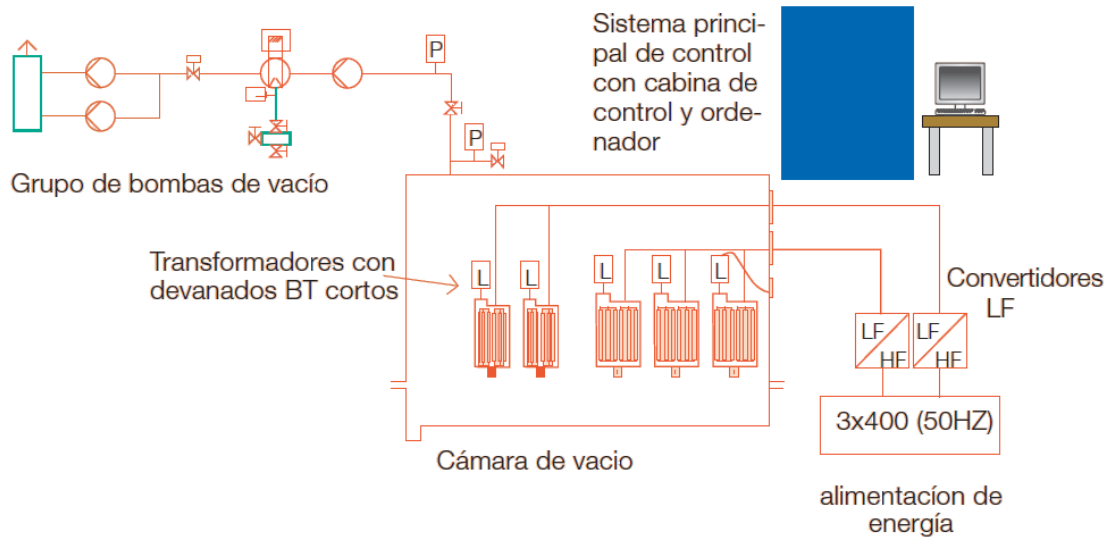


Tomado de (Koestinger et al., 2004)

Otro de los estudios y experimentos prácticos realizados por las empresas ABB y Micafil consistió en emplear el LFH, inyectando una corriente entre 0.4 y 2 Hz por los devanados de alta tensión, manteniendo cortocircuitados los de baja tensión. Con esto se logra sin ningún inconveniente las temperaturas típicas de un proceso convencional de secado, es decir entre 110 y 120 °C, adicionalmente aclaran que la supervisión en los devanados debe ser minuciosa para así evitar la formación de puntos calientes y el deterioro de los aislamientos del transformador. La empresa manifiesta que con la utilización de los métodos habituales de secado, la extracción de humedad en los grupos de transformadores es de aproximadamente 2,5 litros/día y que con la técnica del LFH se logra extraer hasta 20 litros/día, es decir, que la diferencia es de aproximadamente 17,5 litros/día extraídos de los transformadores (Vuolle & Rindlisbacher, 2005).

Por medio de este procedimiento se puede conseguir un ahorro hasta del 50% en la energía utilizada para el proceso de secado, además debido a que se consiguen temperaturas más elevadas dentro de los aislamientos se alcanzan tiempos de sacado más cortos. Adicionalmente se logra obtener valores de humedad por debajo del 1%, es decir, muy cercanos a valores de fábrica. En el año 2005 ABB logró secar 40 transformadores de potencia de hasta de 400 MVA con esta técnica. En la Figura 35 se muestra la configuración de los equipos empleada por ABB en el uso del LFH.

Figura 35. Esquema de la configuración utilizada por ABB en el uso de LFH.



Tomado y Editado de (Vuolle & Rindlisbacher, 2005)

La empresa Hydro One en su experiencia propia con LFH, ha concluido que la frecuencia de la corriente inyectada a los devanados de alta tensión oscila entre 1 mHz y 50 mHz, lo cual reduce el valor de la reactancia inductiva del transformador y por lo tanto la tensión requerida es también de valor pequeño, lo que hace que el tamaño y la potencia de los equipos necesarios para el proceso de LFH sean bajos. Además de lo anterior, la temperatura en los devanados se mantiene uniforme, alcanzando un valor de hasta 100 °C sin tener efectos negativos en la calidad del aislamiento celulósico (Figuerola & Kalicki, 2009).

El proceso típico que lleva esta empresa para desarrollar un secado con ayuda del LFH consta de los siguientes pasos:

- Lo primero es hacer circular calor por el núcleo y los devanados por medio del método de aceite caliente, aplicando la corriente necesaria de LFH a los devanados.
- Vaciar el aceite y luego llevar el transformador a vacío para extraer la humedad
- Sacar el equipo de la cámara de vacío, después se le aplica la corriente LFH y con ayuda del spray de aceite caliente elevar la temperatura de los devanados, repitiendo este proceso hasta alcanzar 110 °C en los arrollamientos.
- Realizar nuevamente la extracción de humedad por medio del vacío.
- Finalmente, se procede a llenar nuevamente de aceite el transformador.

Debido a las altas temperaturas obtenidas con respecto a los tratamientos tradicionales de aceite caliente (110 °C frente a 80 °C), la eliminación de la humedad con LFH es más eficaz y se hace en una cantidad reducida de tiempo.

Hacia el año 2007, Hydro One realizó la comparación entre los métodos convencionales de secado (circulación de aceite caliente con vacío), con la implementación de LFH dentro de estos; para ello se utilizaron dos autotransformadores de 750 MVA a 500 kV, con una vida útil, hasta ese momento, de 33 años (Figueroa & Kalicki, 2009).

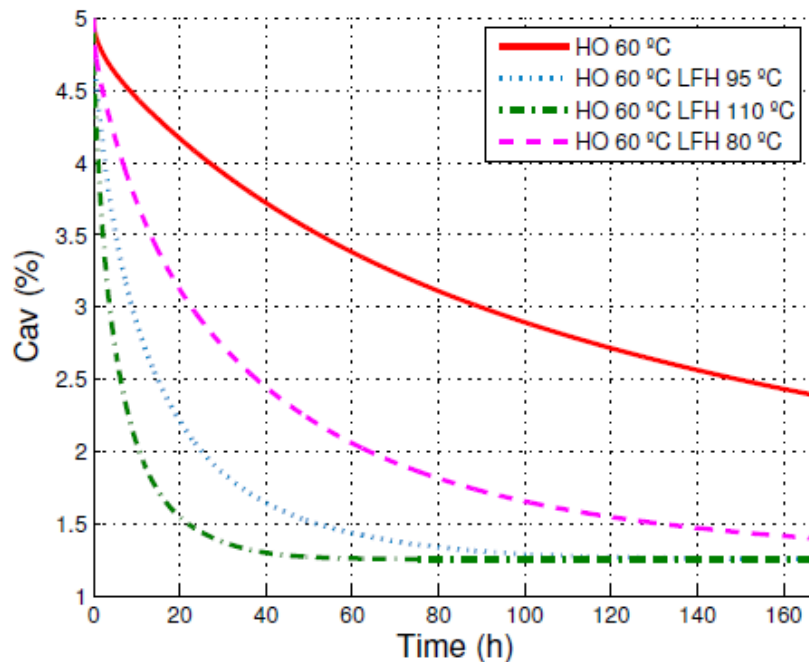
Inicialmente se empleó el método de circulación de aceite caliente para remover la humedad de la superficie. Luego se recurrió al método al vacío ayudándose con LFH, adquiriendo una temperatura en los devanados de 85°C a 110 °C durante los 11 ciclos de secado realizados para cada unidad de transformación. La duración del proceso fue alrededor de 12 días (aproximadamente dos semanas), punto favorable en comparación al método convencional de circulación de aceite caliente con el que se pueden emplear alrededor de 4 a 8 semanas para realizar el secado a la unidad establecida anteriormente (Figueroa & Kalicki, 2009), factor importante para una empresa debido a que al reducir el tiempo en el proceso de extracción de humedad en los transformadores, se reduce el tiempo de mantenimiento de los mismos.

A los autotransformadores utilizados se les extrajo 150 litros a la primera unidad y 160 litros a la segunda. Las muestras tomadas al aislamiento demuestran que las unidades quedaron con un porcentaje de humedad de 0.7% y 0.3% respectivamente, valores bastante cercanos a los de fábrica. Otro elemento importante en la utilización del LFH como agente coadyuvante en el proceso de secado es la reducción en un 25% en la cantidad de personal empleado para tal fin (Figueroa & Kalicki, 2009).

En el año 2009 varios investigadores de la universidad Carlos III de Madrid demostraron por medio de simulaciones y resultados prácticos, el aumento en la eficiencia en los procesos de secado en un transformador al incluir el LFH en ellos. Para ello, emplearon varias muestras del aislamiento sólido de un transformador con las mismas características, entre ellas un espesor de 5 mm y un contenido inicial de humedad del 5% (Garcia, Garcia, Burgos, & Villarroel, 2009).

En la Figura 36 se pueden observar los resultados de la simulación entre el método de circulación de aceite caliente (HO) a una temperatura de 60 °C y éste método con LFH simultáneamente a tres temperaturas diferentes.

Figura 36. Simulación de comparación entre el OH y OH con LFH.



Tomado de (Garcia et al., 2009)

De la Figura 36 se puede inferir que con el método de HO a 60 °C se obtiene una pendiente más sutil, debido a que el coeficiente de difusión del agua en la celulosa es bastante bajo (en el orden de $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$) por lo que su movimiento en el papel es lento, obteniendo al cabo de 160 horas un valor final de humedad alrededor del 2.4%. Por otro lado, si se observan los comportamientos obtenidos cuando se incluye el LFH en el proceso de secado, se puede deducir que el mismo valor de humedad a 80 °C, 95 °C y 110 °C se obtiene en un tiempo aproximado de 38, 17 y 8 horas respectivamente. Es decir que el tiempo es reducido notablemente.

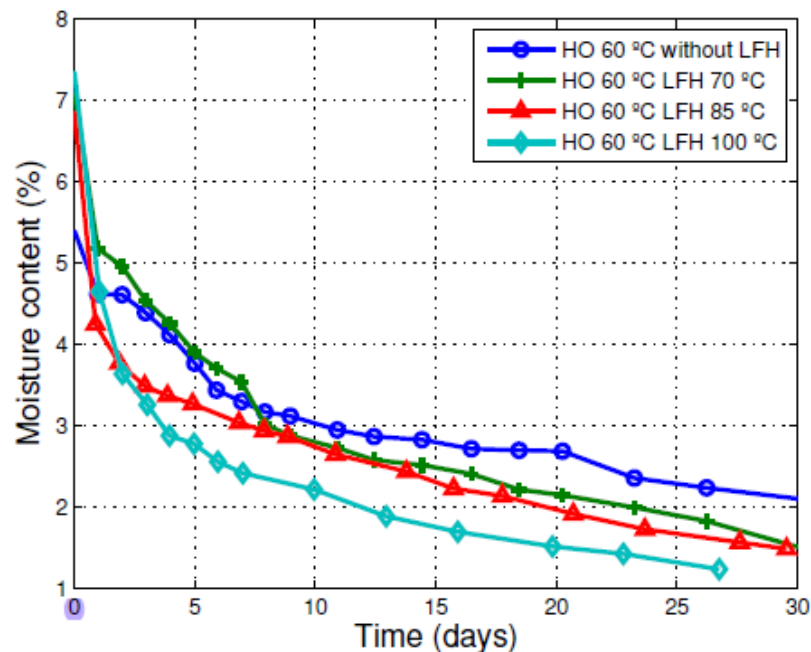
Además cabe resaltar que si se deja pasar el tiempo necesario para obtener el mínimo valor de humedad posible con HO+LHF se obtienen valores aproximados de 1.4% para 80 °C y 1.2%, éste último para temperaturas de 95 °C y 110 °C, los cuales se obtienen en tiempos de 160 horas para el primero, 120 horas para la segunda temperatura y finalmente, aproximadamente 80 horas para una temperatura de 110 °C.

De acuerdo a la IEEE Std 62-1995 (Garcia et al., 2009), el valor límite de humedad en el aislamiento sólido debe estar por debajo del 2%, es decir, que con el método convencional de HO, este valor se obtendrá después de varios días; mientras que

con la ayuda del LFH puede lograrse un valor inferior al 2% en un tiempo cercano a 65, 25 y 11 horas para 80 °C, 95 °C y 110 °C respectivamente.

Al realizar el respectivo proceso con OH a 60 °C y posteriormente con OH+LFH a tres temperaturas diferentes se obtienen curvas características para cada uno de los procesos a muestras de papel de 5 mm, las cuales fueron consignadas en la Figura 37.

Figura 37. Comparación entre HO y HO+LFH a muestras de 5 mm de espesor.



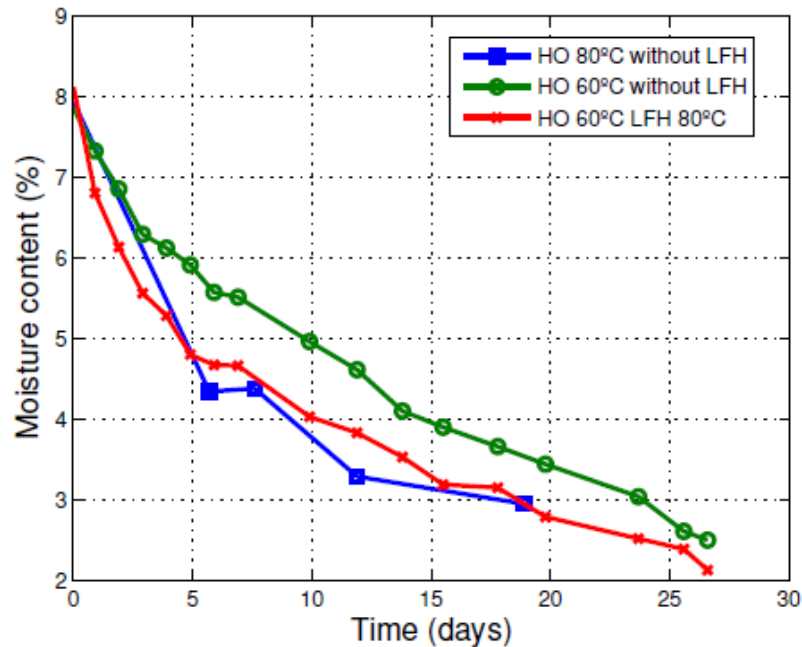
Tomado de (Garcia et al., 2009)

De la Figura 37 se puede establecer que cada una de las muestras empleadas para los diferentes procesos de secado tenía una humedad inicial diferente. Sin embargo, también se observa que el método de HO a 60 °C es el más lento y al final de éste la humedad de la muestra pasa del 5.5% al 2.2% en 30 días (720 horas). A otra muestra con el mismo valor inicial de humedad, se le aplicó HO+LFH a 70 °C obteniendo después de 30 días un valor final de 1.5% de humedad.

Las muestras con los valores más altos de humedad inicial fueron utilizados para aplicarles HO+LFH a 85 °C y 100 °C, pasando de 7.5% a 1.5% (en 30 días) y de 7.5% a 1.3% en 27 días (648 horas) respectivamente.

Finalmente, se realizó un último experimento (Garcia et al., 2009) en el cual emplearon muestras de 3 mm de espesor obteniendo como resultado las curvas detalladas en la Figura 38.

Figura 38. Comparación entre HO y HO+LFH a muestras de 3 mm de espesor.



Tomado de (Garcia et al., 2009)

En la Figura 38 se aprecia que el comportamiento de extracción de humedad es similar en los tres casos, sin embargo la mayor extracción se obtiene con el LFH incluido en el proceso de secado. Además es importante resaltar que aumentar el calor internamente en los devanados del transformador es mucho más sencillo que hacerlo directamente al aceite. Este resultado parece indicar que la velocidad de secado y el contenido de humedad final dependen de la temperatura alcanzada en el aislamiento más que el método utilizado para lograrlo (Garcia et al., 2009).

4.3. ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS PROCESOS DE SECADO EN TRANSFORMADORES

De acuerdo a lo que se ha descrito en 4.1 y 4.2 a continuación se realizará un análisis de los métodos de secado convencionales sin y con la inclusión de LFH. Para ello se tendrá en cuenta el tiempo de secado, el contenido de humedad extraído y la temperatura aplicada, los cuales son características que siempre se

consideran en un proceso de secado, sin importar el porcentaje de humedad inicial y el tamaño del transformador.

Teniendo en cuenta los diferentes ensayos realizados de secado en transformadores y la experiencia de algunas empresas, se puede inferir que los métodos más empleados para realizar el secado son la circulación de aceite caliente y la aplicación de spray de aceite caliente, casi siempre acompañado de ciclos de vacío. Como es sabido, cada uno de los métodos tiene un grado de eficiencia, el cual depende de la temperatura aplicada a los aislamientos, la cantidad de agua extraída por estos y de la potencia del transformador a secar. Comúnmente, la temperatura a la que se realizan los procesos de secado convencionales oscila entre los 40 °C y 80 °C. Dicha temperatura es generada en el aceite y en los aislamientos superficiales, sin poder alcanzar los aislamientos más internos, los cuales generalmente acumulan la mayor cantidad de agua en el transformador.

Un factor importante en los resultados de secado, es el espesor de cada uno de los tipos de aislamiento celulósico que tiene un transformador (papel Kraft vs cartón prensado), ya que de acuerdo a esto el tiempo final de secado se prolonga debido a que cada material tiene un coeficiente de difusión y por ende un tiempo de difusión diferente. Si esto no se tiene presente, en muchos casos no se logrará alcanzar ni siquiera la concentración de equilibrio, dejando humedad en el papel que saldrá a la superficie con el paso del tiempo. En la Tabla 8 se detallan los resultados más relevantes de pruebas realizadas con métodos convencionales de secado, en algunos casos al aceite y en otros al papel.

Tabla 8. Correlación de datos de ensayos de secado convencionales.

Método de secado	Humedad inicial	Tipo aislamiento	Espesor (mm)	Temperatura aplicada (°C)	Tiempo de secado	Humedad final	
HO	38 ppm	Aceite		40	3 meses	18 ppm	
HO	50 ppm	Aceite		80	12 horas	5 ppm	
HO	6%	Kraft	0.5	40	30 días	menor a 3.5%	
			1			menor a 3.5%	
			3			aprox. 3.7%	
HO		Kraft	3	40	4 semanas	3.7%	
				60		1.69%	
				80		0.89%	
HO		Kraft	2	40	7 días	3.5%	
HOS						0.5%	
HO				80		0.9%	
HOS						aprox. 0.2%	

Si se observa la Tabla 8 se puede establecer que, independientemente del método empleado y del tiempo de secado, no siempre se obtienen resultados óptimos de acuerdo a lo acordado por la Tabla 3 y la Tabla 7.

Por otro lado, se puede observar que como se ha venido mencionando, para obtener contenidos de humedad aceptables al final del proceso de secado, es un requisito fundamental una alta temperatura, ya que es por medio de ésta que se logran disminuir los coeficientes de difusión y por ende aumentar la velocidad de migración del agua hacia el exterior. Es por ello, que se le ha apostado al LFH como coadyuvante en los procesos de secado, debido a que si se alcanzan temperaturas más altas, no sólo disminuyen los tiempos de secado sino también se logra extraer la humedad de los aislamientos celulósicos más internos del transformador.

En la Tabla 9 se pueden verificar los resultados de algunos ensayos de secado realizados, en los cuales se compara directamente la eficiencia del secado, en cuanto a reducción de tiempos y cantidad de agua extraída, al incluir el LFH en ellos.

Tabla 9. Correlación de datos comparativos entre diferentes métodos de secado, incluyendo LFH.

Método de secado	Humedad inicial	Tipo aislamiento	Espesor (mm)	Temperatura aplicada (°C)	Tiempo de secado	Humedad final
HO+LFH	3%	Celulósicos (Kraft y cartón prensado)	N.I	Temperatura graduada entre 80 °C y 115 °C	28.8 días	1.5%
HOS+LFH					14.4 días	
HO+Vacío					144 días	
Vapour phase					3.6 días	
On-line oil, 6000 l/h				30	aprox. 1 año	
On-line oil, 200 l/h				50	aprox. 6 meses	
HO+Vacío	1.5%	Celulósicos	N.I	80	aprox. 6 semanas	1.1%
HO+Vacío+LFH				110	12 días	<1%
HO	5%	Kraft	5	60	160 horas	2.5%
HO+LFH				80	160 horas	1.4%
				90	120 horas	1.2%
				110	80 horas	1.2%
HO				5.5%	60	30 días
HO+LFH	70				30 días	1.5%
	7.5%			85		1.5%
						110

Como es de esperarse, se puede ver en la Tabla 9 que ocurren tres acontecimientos importantes. El primero es que la temperatura puede ser elevada significativamente en los aislamientos celulósicos, lo que genera un mejor movimiento del agua desde el interior de estos hacia el aceite, donde puede ser removida por completo del transformador. En segundo lugar, los tiempos de secado disminuyen notablemente, lo que genera un menor gasto de energía y aminora los costos por indisponibilidad o descargo del transformador. Y finalmente, éste método coadyuvante, consigue reducir sustancialmente la cantidad de humedad alojada en el transformador, tanto así que logran ser valores que satisfacen lo estipulado por las normas y/o guías (IEEE Std 62, 1995), (IEEE C57.152, 2013) y (IEEE Std C57.106, 2006).

El uso del LFH se caracteriza por ser una corriente inyectada de baja frecuencia. Éstas corrientes, de acuerdo a los estudios y ensayos realizados por diferentes investigadores y empresas, oscilan entre frecuencias de 150 mHz y 5 Hz. Sin embargo, de acuerdo a lo analizado en el capítulo 3, lo ideal es tener el valor más bajo debido a que con esto se reducen las potencias reactivas necesarias y el tamaño de las fuentes empleadas.

Con base al análisis anterior, se concluye que la inclusión del LFH como método coadyuvante en los procesos de secado, optimiza los mismos, reduciendo los tiempos empleados para tal fin y aumentando la cantidad de agua extraída del transformador, lo que conlleva a un aumento en la ganancia de vida del activo.

4.4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS PROCESOS DE SECADO EN TRANSFORMADORES

Actualmente no existen investigaciones y/o análisis económicos de los métodos de secado ni mucho menos de la inclusión del LFH como agente coadyuvante en los diferentes procesos convencionales. Sin embargo, de acuerdo al conocimiento obtenido sobre las técnicas de secado y la influencia positiva que tiene el calentamiento a baja frecuencia en estos, de acuerdo a la literatura, se estimará económicamente el secado teniendo en cuenta cada uno de los ítems que hacen parte de esto.

De acuerdo a (Burgos, Pirez, García, & García, 2013) la estimación económica de un proceso de secado, puede realizarse por medio de la comparación entre el consumo de vida (pérdida de vida útil) que ha tenido el transformador antes de un proceso de secado y la ganancia de vida que tiene después del secado respectivo (al reducir la humedad, se reduce el proceso de despolimerización), comparando estos valores con el costo que tiene el secado y el costo del transformador.

Como se ha venido mencionando, el proceso de secado se caracteriza por el contenido de humedad inicial en el transformador, el tipo de secado empleado y la duración de éste, el cual está ligado directamente con la temperatura alcanzada y el espesor de los aislamientos celulósicos.

Adicionalmente, se debe tener presente que la estimación de vida en un transformador obedece a la temperatura ambiente a la que ha estado operando, la temperatura del punto caliente (temperatura máxima) que está sujeta a la carga del transformador, el mantenimiento y los parámetros propios de éste (Burgos et al., 2013). Debido a que la distribución de la temperatura al interior del transformador no es uniforme, la parte que se encuentra expuesta a la más alta temperatura (el punto caliente), generalmente presente el mayor deterioro (IEEE C57.91, 2011).

En la norma (IEEE C57.91, 2011) uno de los criterios de pérdida de vida de un transformador establece que la expectativa de vida promedio en el aislamiento es de 180.000 horas a una temperatura de punto caliente (*hot spot*) de 110 °C, cuyo porcentaje de pérdida de vida es 0.0133%. Sin embargo, el valor de horas de trabajo continuo se reduce de acuerdo a la temperatura del punto caliente y al factor de aceleración de envejecimiento (FAA), explicado en la misma norma.

En la Tabla 10 se pueden ver las duraciones de tiempo de funcionamiento continuo en horas para diferentes temperaturas de punto caliente y FAA, con su respectivo porcentaje de pérdida de vida.

Tabla 10. Duraciones de funcionamiento continuo para diferentes valores de pérdida de vida.

Hot spot temp °C	FAA	Percent loss of life ^a						
		0.0133 ^b	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
110	1.00	24	—	—	—	—	—	—
120	2.71	8.86	13.3	—	—	—	—	—
130	6.98	3.44	5.1	12.9	—	—	—	—
140	17.2	1.39	2.1	5.2	10.5	20.9	—	—
150	40.6	0.59	0.89	2.2	4.4	8.8	13.3	17.7
160	92.1	0.26	0.39	0.98	1.96	3.9	5.9	7.8
170	201.2	0.12	0.18	0.45	0.89	1.8	2.7	3.6
180	424.9	0.06	0.08	0.21	0.42	0.84	1.27	1.7
190	868.8	0.028	0.04	0.10	0.21	0.41	0.62	0.82
200	1723	0.014	0.02	0.05	0.10	0.21	0.31	0.42

^a Based on a normal life of 180 000 h. Time durations not shown are in excess of 24 h.

^b This column of time durations for 0.0133% loss of life gives the hours of continuous operation above the basis-of-rating hottest-spot temperature (110 °C) for one equivalent day of operation at 110 °C.

Tomado de (IEEE C57.91, 2011)

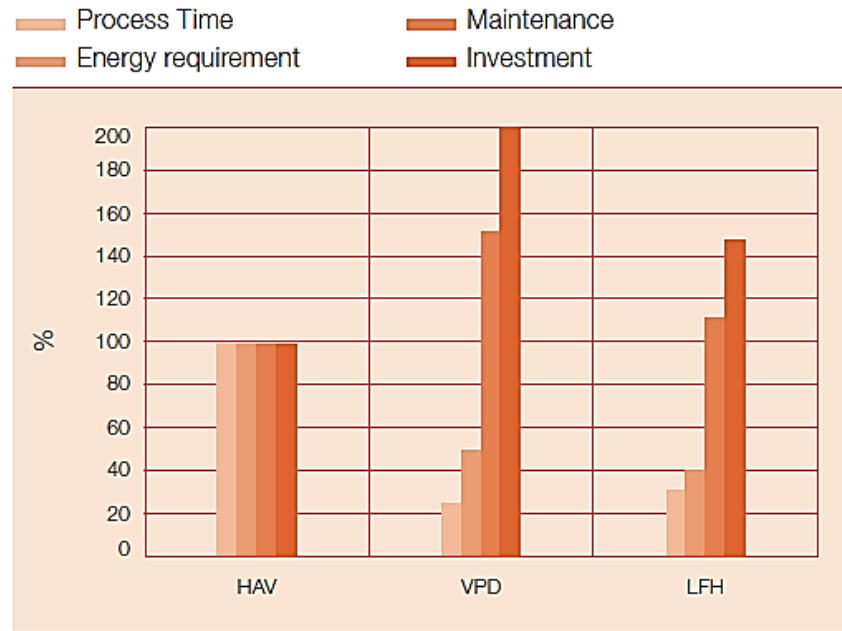
En la Tabla 10 se puede observar como a medida que aumenta la temperatura del punto caliente aumenta el porcentaje de pérdida de vida del transformador. Por lo tanto, es de vital importancia monitorear la temperatura durante el secado, ya que a pesar, de que a mayor temperatura durante el proceso de secado mejor será éste, la temperatura también es un factor perjudicial para el aislamiento y el transformador.

A continuación, se detallarán ciertos parámetros que ayudarán a realizar una estimación económica de un proceso de secado sin y con la utilización del LFH. Como se conoce y de acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 8 y en la Tabla 9, se infiere que el uso del LFH mejora las condiciones del secado, alcanzando altas temperaturas, menores tiempos y mayores cantidades de agua extraídas. Con la reducción de tiempos se minimizan la cantidad de recursos necesarios, personal y energía consumida, logrando así, aminorar los costos del secado.

De acuerdo a (Vuolle & Rindlisbacher, 2005) el tiempo, los requerimientos de energía, el mantenimiento y los costos de inversión varían de un método de secado

a otro. En la Figura 39 se puede ver la relación en porcentaje entre la circulación de aire caliente con vacío, secado de fase de vapor y el LFH.

Figura 39. Comparación de diferentes métodos de secado en términos de tiempo de proceso, inversión, costes de mantenimiento y energía necesaria.



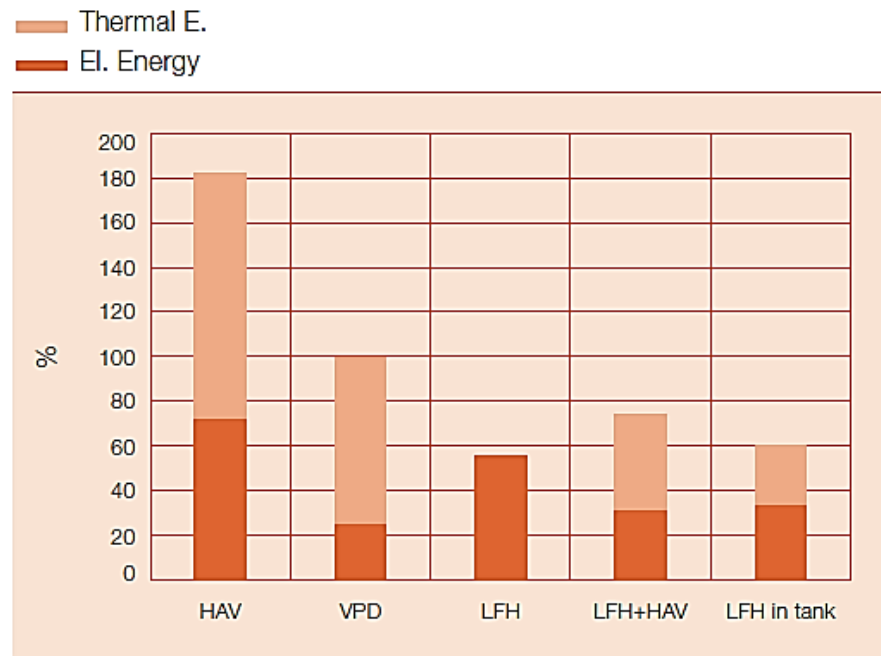
Tomada de (Vuolle & Rindlisbacher, 2005)

En la Figura 39 puede observarse que el método que toman como referencia para el análisis es el de circulación de aire caliente y vacío (HAV), en donde se consumen el 100% de los recursos de un secado. De acuerdo a ello, el método de secado de fase de vapor (VPD) es el que menos tiempo requiere, sin embargo éste es un método que por sus condiciones solo puede realizarse en fábrica y actualmente la industria le está apuntando a métodos de campo, y en el mejor de los casos métodos on-line. Es por esta razón, que el método del LFH sobresale entre los métodos off-line para ser aplicados en campo.

Por otro lado, si se entra a comparar la cantidad de mantenimiento (tiempo y personal) e inversión (equipos), el VPD es el que tiene estas dos particularidades más altas. El LFH, tiene una mayor inversión y demanda más mantenimiento respecto al HAV, sin embargo, como en la eficiencia de un proceso de secado prevalece el tiempo y la cantidad de energía requerida, el método que comprende todas estas características de manera óptima es el LFH.

En la Figura 40 se puede percibir de manera detallada la cantidad de energía eléctrica y térmica que requieren algunos de los diferentes métodos convencionales de secado.

Figura 40. Requisitos de energía térmica y eléctrica en los procesos de secado.



Tomada de (Vuolle & Rindlisbacher, 2005)

Teniendo como referencia la Figura 40 se puede inferir que el HAV es el método que requiere mayor cantidad de energía tanto térmica como eléctrica. El VPD tiene un mayor gasto de energía térmica respecto al LFH, a pesar de que éste lo sobrepasa en el consumo de energía eléctrica. Sin embargo, es el consumo total de energía (térmica y eléctrica) el que se debe analizar para lograr discernir cual es el método más eficiente técnica y económicamente. En este caso, es el LFH el método con menor gasto de energía, con un 0% en cuanto al consumo de energía térmica y un poco menos del 60% en energía eléctrica. Al final, al comparar la energía total invertida en el secado, es el LFH el que tiene el menor gasto, con un consumo total aproximado de 57%.

Otro de los factores que entra a ser parte fundamental en el costo de un proceso de secado es el costo por disponibilidad o descargo que tiene un transformador, el cual es variable y depende de la compañía, de la importancia del transformador en el sistema eléctrico, entre otros. Sin embargo, es claro que al requerir menos tiempo de secado cuando se emplea el LFH, los cargos por indisposición del activo se

aminoran en el mismo porcentaje de reducción del tiempo de secado, es decir, en la mayoría de los casos se logra una disminución superior al 50% (ver Tabla 9).

Respecto al secado con inclusión del LFH, el variador de velocidad o la fuente empleada para el LFH es un costo adicional, que se tiene en cuenta como equipo adquirido antes de realizar el secado. Sin embargo, el valor asociado al variador se considera como un 10% en el valor del secado, debido a que es una inversión inicial que se aprovechará durante un tiempo prolongado. En términos generales, los variadores de 800 kW, son equipos que se deben hacer bajo pedido directo con las empresas debido a su alta potencia. El precio comercial varía de acuerdo a la compañía, aunque éste se obtiene bajo consulta directa con la empresa (Catálogo ABB, 2010), (Schneider Electric, 2013).

De acuerdo a lo anteriormente detallado en este apartado, el costo que puede tener un proceso convencional de secado se puede sintetizar en la siguiente ecuación:

$$Secado (\$) = M_{sec} + C_v + c_{dis} + c_{e.c} - G_v - c_t \quad (16)$$

Donde,

M_{sec} : Costo del método de secado empleado, el cual es función de los equipos, recursos y personal.

C_v : Consumo de vida del transformador, el cual es función de la temperatura ambiente, la temperatura del punto caliente, el mantenimiento y los parámetros propios de cada transformador.

c_{dis} : Costo por disponibilidad del transformador, el cual es función de la duración del método de secado empleado.

$c_{e.c}$: Cantidad de energía consumida, que es función de la duración del secado.

G_v : Ganancia de vida del transformador, que depende directamente de la cantidad de humedad extraída.

c_t : Costo del transformador.

Si se estima ahora, el costo que tendría un proceso de secado con la inclusión del LFH, la ecuación que lo representa es:

$$Sec_{LFH} (\$) = M_{sec} + C_v + 0.1 c_{var} + 0.5c_{dis} + 0.5c_{e.c} - G_v - c_t \quad (17)$$

Donde,

c_{var} : Costo del variador empleado en el secado con LFH.

De las ecuaciones (16) y (17) se puede asegurar, que a pesar de que al incorporar el LFH en los métodos convencionales de secado hay una inversión adicional, ésta es baja en comparación al ahorro de tiempo del proceso de secado y por ende del tiempo de indisponibilidad del transformador, además del notorio ahorro de energía consumida. Debido a todo lo anterior, se concluye que el secado con LFH es más económico que un secado convencional.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES GENERALES

Es importante conocer las diferentes normas y guías que sirven para estimar la vida útil de los transformadores, ya que en ellas, se proporcionan valores que sirven como base para lograr maximizarla.

Se estimaron las características mínimas de una fuente, para incluir el LFH en el proceso de secado de los transformadores en Colombia. Se obtuvo como resultado que, de acuerdo a las potencias de la región (siendo 115 MVA la mayor) la fuente deberá ser capaz de entregar 800 kW. De acuerdo a esto, en el país es viable la utilización del LFH, ya que de acuerdo a los resultados, se necesitaría un variador de 800 kW, el cual está disponible en la industria, para aplicar esta técnica coadyuvante en transformadores de hasta 115 MVA.

El LFH optimiza los procesos de secado convencionales, reduciendo el tiempo y la cantidad de energía empleada en hasta un 50% y logrando por medio de éste un aumento en la temperatura durante el secado, obteniendo así una extracción de humedad superior a un proceso convencional. De esta manera se incrementa la ganancia de vida del transformador.

Se establecieron dos ecuaciones en las cuales se involucran los factores que influyen en un secado convencional y en uno incluyendo el LFH, obteniendo que el secado con LFH es más económico a mediano plazo, a pesar de la inversión realizada para éste. Con esto se puede establecer que en Colombia la incursión del secado con LFH es viable económicamente debido a su valor costo-beneficio.

Por medio de la inclusión del LFH se aminoran los costos finales del secado, ya que como se mencionó anteriormente, al disminuir el tiempo durante estos, se reducen los costos por indisponibilidad del transformador, la cantidad de energía requerida y los recursos necesarios.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

Como trabajos futuros se recomiendan:

- Realizar un estudio económico, tanto de los procesos de secado convencionales como del LFH, para mostrar cuantitativamente los resultados obtenidos.

- Diseñar y construir una fuente especializada para realizar el secado con LFH de acuerdo a la estimación previamente realizada, con la cual se pueda controlar la temperatura durante el secado.
- Realizar ensayos de secado con la inclusión del LFH en Colombia, con la fuente implementada, para demostrar la optimización económica que se obtiene al utilizar esta técnica en los procesos de secado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ABB. (2003). *Determining Transformer Dryness*. Boston.
- Almendros-Ibaez, J. A., Burgos, J. C., & Garcia, B. (2009). Transformer field drying procedures . A theoretical analysis. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 24(4), 1978 – 1986.
- Ba, S. (2013). TRANSFORMER OIL MAINTENANCE. *International Sugar Journal*, 116(1385), 464–470.
- Bélanger, M. (2003). APPLYING AN ON-LINE DRY-OUT PROCESS TO POWER TRANSFORMERS. *Electricity Today*, (5), 1–5.
- Burgos, J. C., Pirez, J. L., Garcia, B., & Garcia, D. F. (2013). A tool to Evaluate the Economy of a Transformer Drying Process. *Solid Dielectrics (ICSD), 2013 IEEE International Conference on*, 1032–1035.
- Catálogo ABB. (2010). Catálogo: convertidores de frecuencia de baja tensión ABB.
- Cigré Brochure 227. (2003). Life management techniques for power transformer. *Cigré 227*. Paris: CIGRE WG A2.18.
- Cigré Brochure 323. (2007). AGEING OF CELULOSE IN MINERAL-OIL INSULATED TRANSFORMERS. *Cigré 323*. CIGRE TF D1.01.10.
- Cigré Brochure 349. (2008). Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems. *Cigré 349*. Working Group A2. 30.
- Diguero, D., & Cano, M. (2012). Effective and efficient evaluation of vacuum drying of power transformers in the field. *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*, 1–4.
- Figueroa, E., & Kalicki, T. (2009). Low frequency heating field dry-out of a 750 MVA 500 kV autotransformer. *Electricity Today*, 8–10.
- Flores Castro, W. C. (2011). *Estimación de la Vida Técnica Remanente de Transformadores de Potencia*. Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.
- Garcia, D. F. (2012). *DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD EN PAPELES AISLANTES DE TRANSFORMADOR*. Universidad Carlos III de Madrid.

- Garcia, D. F. (2013). Conferencia: Humedad en transformadores de potencia.
- Garcia, D. F., Garcia, B., Burgos, J. C., & Villarroel, R. (2009). Transformer field drying improvement by applying low-frequency-heating. *Engineering Applications (WEA), 2012 Workshop on*.
- Höhlein, I., & Kachler, A. . (2005). Aging of Cellulose at Transformer Service Temperatures . Part 2 . Influence of Moisture and Temperature on Degree of Polymerization and Formation of Furanic Compounds in Free-Breathing Systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 21(5), 20–24.
- IEEE C57.152. (2013). IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers , Regulators , and Reactors IEEE Power and Energy Society. New York, USA: IEEE Power & Energy Society.
- IEEE C57.91. (2011). IEEE Guide for Loading Mineral- Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. New York, USA: IEEE Power & Energy Society.
- IEEE Std 62. (1995). IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus Part 1 : Oil Filled Power Transformers , Regulators , and Reactors. New York, USA.
- IEEE Std C57.106. (2006). IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. New York.
- IEEE Std C57.140. (2006). IEEE Guide for the Evaluation and Reconditioning of Liquid Immersed Power Transformers. New York, USA.
- Koestinger, P., Aronsen, E., Boss, P., & Rindlisbacher, G. (2004). A2-205 PRACTICAL EXPERIENCE WITH THE DRYING OF POWER TRANSFORMERS IN THE FIELD, APPLYING THE LFH TECHNOLOGY. *Cigré*.
- Margalló Gasco, I. (n.d.). *Diagnóstico del consumo de vida de un transformador a través del análisis de compuestos furánicos*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Martinez, B. M. G., & Bermúdez Flores, G. F. (2005). *Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos con tierra Fuller y desludificación de bobinados en transformadores*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Nejedly, J., & Newesely, G. (2004). Evaluation of the extent of ageing of paper in oil immersed power transformers. París: CIGRE paper D1-302.
- Schneider Electric. (2013). Catálogo: Variadores de velocidad y arrancadores. Barcelona, España.

- Villarroel, R., Garcia, D. F., García, B., & Burgos, J. C. (2012). Comparison of the drying times for kraft paper and pressboard in transformer factory drying. *In Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, 1233–1237.
- Vuolle, R., & Rindlisbacher, G. (2005). Abaratar y secar: el procedimiento de secado por baja frecuencia reduce a la mitad los costes de energía. *Revista ABB*, 3, 66–69.

Anexo I. Datos de los transformadores empleados para el dimensionamiento del a fuente LFH

CAPACIDAD (MVA)	TENSION (kV)	GRUPO CONEXIÓN	Z %	CORRIENTE NOMINAL AT (A)	Pcc (%)
115	230	Yn / D	13,00	289,0	0,70
115	230	Yn / D	12,80	289,0	0,70
115	230	Yn/ Δ	9,95	289,0	0,70
115	230	Yn/ Δ	9,99	289,0	0,70
115	230	Yn/ Δ	9,99	289,0	0,70
90	220	Y / Y0 / D	8,70	236,0	0,70
90	220	Dy11	8,64	236,0	0,70
90	220	Ynd1	9,35	236,2	0,70
90	220	Y/Y/D	9,35	236,0	0,70
58,45	110	YNyn0	7,34	306,8	0,49
58,45	110	YNyn0	7,19	306,8	0,49
58,45	110	YNyn0	9,20	306,8	0,49
58,45	110	YNyn0	7,37	306,8	0,49
58,45	110	YNyn0	7,41	306,8	0,49
43,5	115	YD1	10,82	216,0	0,43
43,5	115	YD1	10,78	216,0	0,43
43,5	115	YD1	10,80	216,0	0,43
43,5	115	YD1	10,78	216,0	0,43
41,75	110	D / Yn11	10,16	219,0	0,45
41,75	110	DYn1	9,70	219,0	0,45
41,75	110	DYn1	8,30	219,0	0,45
41,75	110	Dyn1	8,13	219,1	0,45
41,75	110	Dyn1	9,55	219,1	0,45
41,75	110	DYn1	9,49	219,1	0,45
41,75	110	DYn1	8,07	219,1	0,45
41,75	115	Dyn1	8,35	219,1	0,45
30	110	YNyn0	8,93	157,5	0,58
28	115	Yn / D1	8,70	141,0	0,62
28	34,4	Dyn1	7,93	469,0	0,62
28	34,4	Dyn1	7,79	469,0	0,62
28	34,5	Dyn1	13,11	468,6	0,62
28	34,4	Dyn1	13,60	469,9	0,62
28	34,5	Dyn1	13,27	468,6	0,62

CAPACIDAD (MVA)	TENSION (kV)	GRUPO CONEXIÓN	Z %	CORRIENTE NOMINAL AT (A)	Pcc (%)
28	34,5	Dyn1	13,27	468,6	0,62
28	34,4	Dyn1	8,00	470,0	0,62
28	34,4	Dyn1	7,95	470,0	0,62
28	34,4	Dyn1	14,53	470,0	0,62
28	34,4	Dyn1	14,53	470,0	0,62
28	34,4	Dyn1	14,53	470,0	0,62
28	34,4	Dyn1	14,53	470,0	0,62
28	34,4	Dyn1	11,46	470,0	0,62
28	34,4	Dyn1	11,29	470,0	0,62
28	34,5	Dyn1	14,53	470,0	0,62
28	34,4	Dyn1	13,60	494,7	0,62
25	110	D/Yn11	12,28	131,2	0,56
20	34,5	DYn1	8,71	334,7	0,57
20	34,5	DYn1	9,90	334,7	0,57

Anexo II. Resultados para el cálculo de condensadores en conexión Y

CAPACIDAD (MVA)	fp	Qn (kVAR)	Qc (VAR)	C (mF)	Sf nueva (KVA)
115	0,54	390,72	856103,78	3,10	896,44
115	0,55	390,72	836865,60	3,09	896,44
115	0,65	390,72	562597,38	2,88	896,44
115	0,64	390,72	566448,85	2,88	896,44
115	0,64	390,72	566448,85	2,88	896,44
90	0,70	304,61	344736,17	2,24	698,87
90	0,70	304,61	340228,64	2,23	698,87
90	0,67	305,13	394222,87	2,37	700,06
90	0,67	304,61	393555,55	2,37	698,87
58,45	0,63	139,49	217264,10	9,29	320,03
58,45	0,64	139,49	209940,17	9,20	320,03
58,45	0,54	139,49	308035,00	9,78	320,03
58,45	0,63	139,49	218728,80	9,31	320,03
58,45	0,62	139,49	220681,70	9,33	320,03
43,5	0,43	89,06	294320,73	7,25	204,34
43,5	0,43	89,06	292901,15	7,26	204,34
43,5	0,43	89,06	293610,94	7,26	204,34
43,5	0,43	89,06	292901,15	7,26	204,34
41,75	0,47	90,94	261778,77	7,51	208,64
41,75	0,49	90,94	245777,22	7,57	208,64
41,75	0,55	90,94	197065,58	7,64	208,64
41,75	0,55	91,02	191323,75	7,62	208,83
41,75	0,49	91,02	240778,71	7,59	208,83
41,75	0,50	91,02	238689,46	7,60	208,83
41,75	0,56	91,02	189233,61	7,62	208,83
41,75	0,54	99,48	217488,11	6,99	228,24
30	0,61	84,07	138830,65	4,12	192,87
28	0,65	84,53	119183,85	3,14	193,95
28	0,69	83,69	100045,09	33,03	192,01
28	0,69	83,69	96781,27	32,56	192,01
28	0,49	84,02	221541,01	37,62	192,78
28	0,48	84,01	232945,17	37,62	192,74
28	0,49	84,02	225278,57	37,56	192,78

CAPACIDAD (MVA)	fp	Qn (kVAR)	Qc (VAR)	C (mF)	Sf nueva (KVA)
28	0,49	84,02	225278,57	37,56	192,78
28	0,68	84,03	102089,19	33,25	192,79
28	0,68	84,03	100918,92	33,09	192,79
28	0,46	84,03	254717,13	37,09	192,79
28	0,46	84,03	254717,13	37,09	192,79
28	0,46	84,03	254717,13	37,09	192,79
28	0,46	84,03	254717,13	37,09	192,79
28	0,54	84,05	183035,81	38,06	192,83
28	0,55	84,05	179062,17	38,02	192,83
28	0,46	84,52	256200,19	36,87	193,91
28	0,48	93,10	258151,09	37,62	213,60
25	0,48	68,29	187291,32	3,61	156,67
20	0,62	54,96	89904,42	28,40	126,09
20	0,57	54,96	109775,38	29,35	126,09

Anexo III. Resultados para el cálculo de condensadores en conexión delta

CAPACIDAD (MVA)	fp	Qn (kVAR)	Qc (VAR)	C (mF)	Sf nueva (KVAR)
115	0,54	390,72	856103,78	1,03	896,44
115	0,55	390,72	836865,60	1,03	896,44
115	0,65	390,72	562597,38	0,96	896,44
115	0,64	390,72	566448,85	0,96	896,44
115	0,64	390,72	566448,85	0,96	896,44
90	0,70	304,61	344736,17	0,75	698,87
90	0,70	304,61	340228,64	0,74	698,87
90	0,67	305,13	394222,87	0,79	700,06
90	0,67	304,61	393555,55	0,79	698,87
58,45	0,63	139,49	217264,10	3,10	320,03
58,45	0,64	139,49	209940,17	3,07	320,03
58,45	0,54	139,49	308035,00	3,26	320,03
58,45	0,63	139,49	218728,80	3,10	320,03
58,45	0,62	139,49	220681,70	3,11	320,03
43,5	0,43	89,06	294320,73	2,42	204,34
43,5	0,43	89,06	292901,15	2,42	204,34
43,5	0,43	89,06	293610,94	2,42	204,34
43,5	0,43	89,06	292901,15	2,42	204,34
41,75	0,47	90,94	261778,77	2,50	208,64
41,75	0,49	90,94	245777,22	2,52	208,64
41,75	0,55	90,94	197065,58	2,55	208,64
41,75	0,55	91,02	191323,75	2,54	208,83
41,75	0,49	91,02	240778,71	2,53	208,83
41,75	0,50	91,02	238689,46	2,53	208,83
41,75	0,56	91,02	189233,61	2,54	208,83
41,75	0,54	99,48	217488,11	2,33	228,24
30	0,61	84,07	138830,65	1,37	192,87
28	0,65	84,53	119183,85	1,05	193,95
28	0,69	83,69	100045,09	11,01	192,01
28	0,69	83,69	96781,27	10,85	192,01
28	0,49	84,02	221541,01	12,54	192,78
28	0,48	84,01	232945,17	12,54	192,74
28	0,49	84,02	225278,57	12,52	192,78

CAPACIDAD (MVA)	fp	Qn (kVAR)	Qc (VAR)	C (mF)	Sf nueva (KVAR)
28	0,49	84,02	225278,57	12,52	192,78
28	0,68	84,03	102089,19	11,08	192,79
28	0,68	84,03	100918,92	11,03	192,79
28	0,46	84,03	254717,13	12,36	192,79
28	0,46	84,03	254717,13	12,36	192,79
28	0,46	84,03	254717,13	12,36	192,79
28	0,46	84,03	254717,13	12,36	192,79
28	0,54	84,05	183035,81	12,69	192,83
28	0,55	84,05	179062,17	12,67	192,83
28	0,46	84,52	256200,19	12,29	193,91
28	0,48	93,10	258151,09	12,54	213,60
25	0,48	68,29	187291,32	1,20	156,67
20	0,62	54,96	89904,42	9,47	126,09
20	0,57	54,96	109775,38	9,78	126,09

Anexo IV. Resultados para el dimensionamiento de la fuente LFH

Capacidad (MVA)	Frecuencia 0,2 Hz					Frecuencia 1 Hz				
	Z (Ω)	Sf (KVA)	Pf (kW)	Qf (kVAR)	VL (V)	Z (Ω)	Sf (KVA)	Pf (kW)	Qf (kVAR)	Vf(linea)
115	3,226	808,353	806,813	49,873	1614,888	3,370	844,470	806,813	249,365	1687,042
115	3,226	808,306	806,813	49,104	1614,794	3,366	843,342	806,813	245,518	1684,788
115	3,224	807,714	806,813	38,133	1613,611	3,309	829,035	806,813	190,664	1656,207
115	3,224	807,721	806,813	38,287	1613,626	3,309	829,213	806,813	191,435	1656,562
115	3,224	807,721	806,813	38,287	1613,626	3,309	829,213	806,813	191,435	1656,562
90	3,768	629,530	628,993	25,974	1540,081	3,844	642,261	628,993	129,869	1571,226
90	3,768	629,522	628,993	25,794	1540,063	3,843	642,079	628,993	128,968	1570,782
90	3,768	630,681	630,060	27,974	1541,591	3,856	645,398	630,060	139,870	1577,566
90	3,768	629,613	628,993	27,927	1540,285	3,856	644,306	628,993	139,633	1576,230
58,45	1,021	288,385	288,032	14,270	542,697	1,051	296,738	288,032	71,350	558,415
58,45	1,021	288,371	288,032	13,977	542,670	1,050	296,389	288,032	69,886	557,758
58,45	1,022	288,588	288,032	17,901	543,078	1,068	301,618	288,032	89,505	567,599
58,45	1,021	288,388	288,032	14,329	542,702	1,051	296,808	288,032	71,643	558,548
58,45	1,021	288,392	288,032	14,407	542,709	1,051	296,903	288,032	72,034	558,726
43,5	1,318	184,548	183,909	15,335	493,281	1,424	199,254	183,909	76,677	532,588
43,5	1,318	184,543	183,909	15,279	493,268	1,423	199,144	183,909	76,393	532,297
43,5	1,318	184,545	183,909	15,307	493,274	1,423	199,199	183,909	76,535	532,443
43,5	1,318	184,543	183,909	15,279	493,268	1,423	199,144	183,909	76,393	532,297
41,75	1,309	188,305	187,776	14,109	496,429	1,394	200,589	187,776	70,543	528,814
41,75	1,308	188,258	187,776	13,469	496,306	1,386	199,486	187,776	67,343	525,906
41,75	1,308	188,129	187,776	11,520	495,965	1,365	196,412	187,776	57,600	517,801
41,75	1,307	188,286	187,947	11,294	496,153	1,363	196,247	187,947	56,469	517,131
41,75	1,308	188,415	187,947	13,272	496,493	1,384	199,318	187,947	66,360	525,224
41,75	1,308	188,410	187,947	13,188	496,478	1,383	199,180	187,947	65,942	524,858
41,75	1,307	188,281	187,947	11,210	496,140	1,362	196,127	187,947	56,051	516,815
41,75	1,429	205,813	205,422	12,679	542,337	1,493	214,981	205,422	63,394	566,497
30	2,336	173,819	173,590	8,916	637,170	2,408	179,223	173,590	44,579	656,980
28	2,930	174,748	174,558	8,149	715,536	3,005	179,249	174,558	40,744	733,970
28	0,262	172,966	172,809	7,349	212,925	0,268	176,673	172,809	36,747	217,489
28	0,262	172,960	172,809	7,219	212,918	0,268	176,538	172,809	36,094	217,323
28	0,264	173,934	173,504	12,223	214,309	0,279	183,953	173,504	61,113	226,653
28	0,263	173,936	173,473	12,678	213,709	0,279	184,693	173,473	63,391	226,926
28	0,264	173,945	173,504	12,372	214,322	0,280	184,202	173,504	61,861	226,961
28	0,264	173,945	173,504	12,372	214,322	0,280	184,202	173,504	61,861	226,961
28	0,262	173,670	173,510	7,445	213,359	0,268	177,458	173,510	37,223	218,013
28	0,262	173,668	173,510	7,398	213,357	0,268	177,409	173,510	36,989	217,953
28	0,263	174,038	173,510	13,550	213,812	0,281	186,268	173,510	67,749	228,837
28	0,263	174,038	173,510	13,550	213,812	0,281	186,268	173,510	67,749	228,837
28	0,263	174,038	173,510	13,550	213,812	0,281	186,268	173,510	67,749	228,837
28	0,263	174,038	173,510	13,550	213,812	0,281	186,268	173,510	67,749	228,837
28	0,262	173,876	173,547	10,683	213,590	0,274	181,582	173,547	53,416	223,056
28	0,262	173,866	173,547	10,524	213,578	0,274	181,349	173,547	52,622	222,770
28	0,264	175,052	174,520	13,629	215,057	0,283	187,352	174,520	68,143	230,169
28	0,263	192,757	192,244	14,050	224,974	0,279	204,677	192,244	70,250	238,888
25	2,737	141,379	141,009	10,223	622,047	2,904	149,988	141,009	51,116	659,925
20	0,338	113,631	113,483	5,794	196,010	0,349	117,123	113,483	28,972	202,034
20	0,338	113,674	113,483	6,589	196,085	0,352	118,169	113,483	32,947	203,838

Capacidad (MVA)	Frecuencia 2 Hz					Frecuencia 3 Hz				
	Z (Ω)	Sf (KVA)	Pf (kW)	Qf (kVAR)	VL (V)	Z (Ω)	Sf (KVA)	Pf (kW)	Qf (kVAR)	VL (V)
115	3,786	948,514	806,813	498,731	1894,896	4,391	1100,271	806,813	748,096	2198,068
115	3,769	944,491	806,813	491,036	1886,858	4,360	1092,455	806,813	736,554	2182,454
115	3,562	892,389	806,813	381,328	1782,772	3,947	989,001	806,813	571,993	1975,778
115	3,564	893,049	806,813	382,869	1784,089	3,952	990,339	806,813	574,304	1978,452
115	3,564	893,049	806,813	382,869	1784,089	3,952	990,339	806,813	574,304	1978,452
90	4,073	680,512	628,993	259,738	1664,804	4,428	739,883	628,993	389,607	1810,049
90	4,069	679,826	628,993	257,935	1663,126	4,420	738,462	628,993	386,903	1806,574
90	4,119	689,369	630,060	279,739	1685,044	4,523	756,999	630,060	419,609	1850,354
90	4,119	688,202	628,993	279,266	1683,617	4,523	755,718	628,993	418,899	1848,787
58,45	1,138	321,444	288,032	142,701	604,907	1,271	358,860	288,032	214,051	675,319
58,45	1,134	320,154	288,032	139,771	602,480	1,262	356,256	288,032	209,657	670,419
58,45	1,201	339,127	288,032	179,009	638,184	1,395	393,779	288,032	268,514	741,032
58,45	1,139	321,704	288,032	143,287	605,398	1,273	359,385	288,032	214,930	676,307
58,45	1,140	322,053	288,032	144,068	606,054	1,275	360,087	288,032	216,102	677,628
43,5	1,711	239,458	183,909	153,354	640,051	2,104	294,511	183,909	230,031	787,204
43,5	1,708	239,095	183,909	152,786	639,080	2,099	293,846	183,909	229,179	785,427
43,5	1,710	239,276	183,909	153,070	639,565	2,102	294,179	183,909	229,605	786,315
43,5	1,708	239,095	183,909	152,786	639,080	2,099	293,846	183,909	229,179	785,427
41,75	1,632	234,872	187,776	141,086	619,195	1,966	282,925	187,776	211,629	745,876
41,75	1,606	231,084	187,776	134,685	609,208	1,917	275,817	187,776	202,028	727,137
41,75	1,531	220,297	187,776	115,201	580,771	1,774	255,186	187,776	172,801	672,748
41,75	1,523	219,269	187,947	112,937	577,796	1,757	253,027	187,947	169,406	666,751
41,75	1,598	230,084	187,947	132,719	606,294	1,901	273,782	187,947	199,079	721,443
41,75	1,594	229,603	187,947	131,883	605,026	1,895	272,872	187,947	197,825	719,044
41,75	1,520	218,840	187,947	112,101	576,665	1,751	252,189	187,947	168,152	664,543
41,75	1,676	241,399	205,422	126,788	636,109	1,944	279,942	205,422	190,182	737,674
30	2,622	195,148	173,590	89,159	715,357	2,945	219,133	173,590	133,738	803,280
28	3,230	192,641	174,558	81,487	788,804	3,573	213,098	174,558	122,231	872,569
28	0,285	187,788	172,809	73,493	231,172	0,311	204,978	172,809	110,240	252,333
28	0,284	187,281	172,809	72,188	230,547	0,309	203,931	172,809	108,282	251,044
28	0,322	212,233	173,504	122,226	261,499	0,383	252,422	173,504	183,339	311,017
28	0,324	214,864	173,473	126,782	263,996	0,389	257,408	173,473	190,173	316,268
28	0,324	213,098	173,504	123,721	262,564	0,386	254,056	173,504	185,582	313,029
28	0,324	213,098	173,504	123,721	262,564	0,386	254,056	173,504	185,582	313,029
28	0,285	188,807	173,510	74,447	231,956	0,311	206,339	173,510	111,670	253,495
28	0,285	188,623	173,510	73,979	231,730	0,311	205,960	173,510	110,968	253,030
28	0,332	220,149	173,510	135,498	270,460	0,403	267,236	173,510	203,247	328,309
28	0,332	220,149	173,510	135,498	270,460	0,403	267,236	173,510	203,247	328,309
28	0,332	220,149	173,510	135,498	270,460	0,403	267,236	173,510	203,247	328,309
28	0,332	220,149	173,510	135,498	270,460	0,403	267,236	173,510	203,247	328,309
28	0,308	203,793	173,547	106,833	250,341	0,356	236,217	173,547	160,249	290,170
28	0,306	202,965	173,547	105,243	249,323	0,354	234,606	173,547	157,865	288,191
28	0,334	221,430	174,520	136,287	272,035	0,406	268,792	174,520	204,430	330,220
28	0,324	238,114	192,244	140,500	277,913	0,389	285,261	192,244	210,751	332,940
25	3,372	174,169	141,009	102,232	766,319	4,033	208,324	141,009	153,347	916,597
20	0,379	127,420	113,483	57,945	219,797	0,425	142,944	113,483	86,917	246,575
20	0,390	131,226	113,483	65,893	226,362	0,448	150,491	113,483	98,840	259,594

Capacidad (MVA)	Frecuencia 4 Hz					Frecuencia 5 Hz				
	Z (Ω)	Sf (KVA)	Pf (kW)	Qf (kVAR)	VL (V)	Z (Ω)	Sf (KVA)	Pf (kW)	Qf (kVAR)	VL (V)
115	5,120	1282,918	806,813	997,462	2562,951	5,927	1485,101	806,813	1246,827	2966,864
115	5,073	1270,988	806,813	982,071	2539,119	5,863	1468,987	806,813	1227,589	2934,671
115	4,431	1110,222	806,813	762,657	2217,948	4,984	1248,907	806,813	953,321	2495,006
115	4,439	1112,341	806,813	765,738	2222,181	4,996	1251,849	806,813	957,173	2500,884
115	4,439	1112,341	806,813	765,738	2222,181	4,996	1251,849	806,813	957,173	2500,884
90	4,882	815,775	628,993	519,476	1995,711	5,411	904,037	628,993	649,345	2211,635
90	4,869	813,483	628,993	515,870	1990,105	5,391	900,804	628,993	644,838	2203,728
90	5,034	842,610	630,060	559,479	2059,616	5,624	941,310	630,060	699,349	2300,870
90	5,034	841,184	628,993	558,532	2057,872	5,624	939,716	628,993	698,165	2298,922
58,45	1,436	405,483	288,032	285,402	763,057	1,624	458,514	288,032	356,752	862,852
58,45	1,421	401,381	288,032	279,543	755,337	1,604	452,838	288,032	349,428	852,172
58,45	1,627	459,500	288,032	358,019	864,707	1,885	532,203	288,032	447,523	1001,523
58,45	1,439	406,309	288,032	286,574	764,611	1,628	459,654	288,032	358,217	864,998
58,45	1,443	407,412	288,032	288,136	766,687	1,633	461,178	288,032	360,170	867,865
43,5	2,555	357,620	183,909	306,708	955,889	3,038	425,213	183,909	383,384	1136,560
43,5	2,548	356,647	183,909	305,572	953,287	3,029	423,934	183,909	381,965	1133,140
43,5	2,552	357,133	183,909	306,140	954,588	3,033	424,573	183,909	382,675	1134,850
43,5	2,548	356,647	183,909	305,572	953,287	3,029	423,934	183,909	381,965	1133,140
41,75	2,356	338,941	187,776	282,172	893,550	2,777	399,584	187,776	352,715	1053,425
41,75	2,282	328,360	187,776	269,371	865,657	2,679	385,533	187,776	336,713	1016,382
41,75	2,066	297,228	187,776	230,401	783,583	2,390	343,809	187,776	288,002	906,385
41,75	2,040	293,843	187,947	225,874	774,304	2,355	339,178	187,947	282,343	893,768
41,75	2,258	325,241	187,947	265,438	857,042	2,648	381,332	187,947	331,798	1004,848
41,75	2,249	323,878	187,947	263,767	853,452	2,635	379,516	187,947	329,709	1000,061
41,75	2,031	292,559	187,947	224,202	770,923	2,343	337,440	187,947	280,253	889,188
41,75	2,266	326,342	205,422	253,576	859,943	2,623	377,714	205,422	316,970	995,315
30	3,344	248,859	173,590	178,318	912,245	3,796	282,518	173,590	222,897	1035,631
28	4,004	238,812	174,558	162,975	977,859	4,498	268,275	174,558	203,719	1098,502
28	0,344	226,866	172,809	146,987	279,277	0,382	252,232	172,809	183,733	310,504
28	0,341	225,183	172,809	144,376	277,206	0,379	249,865	172,809	180,469	307,589
28	0,455	299,768	173,504	244,453	369,352	0,533	351,389	173,504	305,566	432,956
28	0,464	307,226	173,473	253,564	377,478	0,545	361,322	173,473	316,955	443,944
28	0,459	302,211	173,504	247,443	372,363	0,538	354,644	173,504	309,303	436,966
28	0,459	302,211	173,504	247,443	372,363	0,538	354,644	173,504	309,303	436,966
28	0,345	228,637	173,510	148,893	280,889	0,384	254,451	173,510	186,117	312,602
28	0,344	228,029	173,510	147,957	280,141	0,383	253,596	173,510	184,946	311,552
28	0,486	321,783	173,510	270,996	395,322	0,574	380,597	173,510	338,745	467,576
28	0,486	321,783	173,510	270,996	395,322	0,574	380,597	173,510	338,745	467,576
28	0,486	321,783	173,510	270,996	395,322	0,574	380,597	173,510	338,745	467,576
28	0,415	275,266	173,547	213,665	338,138	0,481	318,514	173,547	267,081	391,264
28	0,412	272,806	173,547	210,486	335,116	0,476	315,189	173,547	263,108	387,180
28	0,488	323,657	174,520	272,574	397,624	0,578	382,813	174,520	340,717	470,299
28	0,464	340,469	192,244	281,001	397,376	0,545	400,419	192,244	351,251	467,345
25	4,808	248,372	141,009	204,463	1092,803	5,651	291,897	141,009	255,579	1284,309
20	0,483	162,200	113,483	115,890	279,791	0,548	184,020	113,483	144,862	317,430
20	0,517	173,914	113,483	131,786	299,997	0,595	200,038	113,483	164,733	345,062